

Câmaras de Fluxo

e suas aplicabilidades para avaliação de cenários de Intrusão de Vapores

White Paper

Câmaras de Fluxo e suas aplicabilidades para avaliação de cenários de Intrusão de Vapores

José Carlos Rocha Gouvêa Júnior¹; Marcio Costa Alberto²

¹ – Geólogo, Dr. - CSN – Gerente de Projetos e Passivos Ambientais - Companhia Siderúrgica Nacional e Vice-Presidente da NICOLE Latin America (jose.gouvea@csn.com.br)

² – Geólogo, Dr. (mrалberto@geoinovacoes.com.br)

Agosto • 2021

Documento desenvolvido em conjunto com o Grupo de Trabalho de Intrusão de Vapores da rede NICOLE Latin America e publicado em agosto de 2021.

I. Introdução

Um dos grandes desafios atuais do cenário de intrusão de vapores se refere à determinação da relação da presença de vapores do solo com riscos à saúde humana pela inalação de vapores provenientes destes.

O fato reside na dificuldade em se associar os contaminantes detectados na fase vapor nos solos com aqueles detectados no ar ambiente de edificações, pela possibilidade de haver interferência de contaminantes já existentes no próprio ambiente.

O que se aplica hoje em dia, com base em uma premissa definida pela USEPA – United States Environmental Protection Agency, é de se utilizar um fator de atenuação (α) de 0,03 em todos os casos, como base para efetuar a avaliação de riscos à saúde humana para este cenário, embora diversas medições realizadas em campo tenham indicado valores diferentes, menos conservadores.

Dessa forma, o uso de ferramentas que possibilitem a avaliação destes cenários de maneira mais precisa é uma urgente necessidade.

Uma dessas ferramentas é a câmara de fluxo (ou *flux chambers*) e que vêm tendo crescimento em seu uso no Brasil no último ano. Os objetivos do uso desta ferramenta são: (i) determinar a concentração potencialmente proveniente de vapores acumulados sob as edificações, e (ii) subsidiar o cálculo do fator de atenuação.

Tendo em vista a importância deste tema, neste artigo apresentamos uma síntese desta ferramenta, com suas devidas aplicabilidades, apresentando também as vantagens e desvantagens do uso da mesma como apoio na solução de problemas associados à intrusão de vapores.

II. Câmaras de Fluxo (*Flux Chambers*)

De acordo com Hartman (2003), a determinação de fluxos verticais de contaminantes em fase vapor, a partir da utilização de dados obtidos por meio de análises em matrizes ambientais provenientes de ambientes subsuperficiais (ex.: solo, águas subterrâneas, vapores do solo), requer a aplicação de modelos matemáticos ou o uso de fatores de atenuação para prever as concentrações dos contaminantes com potencial para migrar para o interior de edificações existentes na superfície do terreno.

Fatores de atenuação (ex.: fator de atenuação alfa – α – calculado a partir do algoritmo de JOHNSON & ETTINGER, 1991), são definidos como a razão entre as concentrações presentes na fonte de contaminação subsuperficial e as concentrações medidas no interior de ambientes fechados, comumente calculados a partir de concentrações determinadas em água subterrânea e/ou no perfil do solo, utilizando-se a constante de Henry específica para cada contaminante para se prever o particionamento do mesmo para a fase vapor.

Atualmente, os fatores de atenuação previstos nos modelos ainda não possuem uma validação de campo por meio de dados empíricos, visto que não existe, até o momento, uma base de dados acumulados suficiente para este tipo de análise. Desta forma, a abordagem usual nos guias e manuais disponíveis em nível mundial, recomenda o uso de fatores de atenuação genéricos, que podem ser conservadores em diversas ordens de magnitude por não incluírem, na sua rotina de cálculo, variáveis importantes do meio físico, que são de complexa determinação.

Sendo assim, existe a possibilidade de se obter uma falsa conclusão sobre a incidência de riscos a partir de avaliações conduzidas com a utilização de dados obtidos exclusivamente em subsuperfície, especialmente quando dados geotécnicos específicos da área sob investigação não estão disponíveis.

Neste contexto, a utilização de câmaras de fluxo, comumente referenciadas na literatura específica como *flux chambers*, fornece uma medida direta das concentrações dos contaminantes existentes em subsuperfície, diminuindo as incertezas introduzidas pela utilização de modelos preditivos de fluxos verticais ascendentes ou pelo uso de fatores de atenuação genéricos e conservadores do ponto de vista protetivo.

Teoricamente, as concentrações medidas com a utilização de câmaras de fluxo refletem os efeitos dos processos de transporte e destino de contaminantes em subsuperfície que, operacionalmente, podem ser de difícil determinação, tais como por exemplo, particionamento entre fases, biodegradação, presença de caminhos preferenciais, permeabilidade da laje de concreto, entre outros fatores.

Câmaras de fluxo também podem ser utilizadas para a estimativa preditiva para edificações novas, onde os pisos e lajes serão instalados sobre uma grade e em terrenos sem nenhum tipo de pavimentação, onde se pretende, em um cenário de ocupação futuro, construir uma edificação, considerando-se que os efeitos relacionados a esta nova construção sejam conhecidos ou considerados durante a interpretação dos resultados.

Nestes casos, é recomendável a realização de medições em quantidade suficiente para garantir que as variações espaciais no entorno da pegada da edificação (delimitação da área prevista para a construção da edificação) sejam adequadamente cobertas, devido a probabilidade da existência de possíveis caminhos

preferenciais (ex.: junção da fundação com a laje/piso). Adicionalmente, as medições devem ser feitas por um período de tempo suficiente para garantir que as variações temporais no fluxo sejam representativas.

Entretanto, assim como é o caso de outras técnicas disponíveis, a utilização de câmaras de fluxo não é aplicável em todas as situações e suas limitações devem ser conhecidas para a aplicação correta do método. Exemplos destas limitações incluem:

a) Ambientes confinados: A aplicação de câmaras de fluxo em porões ou em outro tipo similar de ambiente confinado pode não ser viável, visto que as paredes laterais que delimitam o porão também podem possuir contaminações, sendo assim, potenciais fontes para o processo de intrusão de vapores que não serão adequadamente medidas neste tipo de abordagem.

b) Avaliação de cenários futuros: Durante a avaliação do processo de intrusão de vapores em cenários de uso futuro (ex.: lotes não urbanizados, terrenos onde é prevista a construção de empreendimentos residenciais, industriais e etc.), medições realizadas com câmaras de fluxo podem ser superestimadas, em função da ausência de estruturas impeditivas para o estabelecimento de fluxos verticais de vapores, tais como fundações, pisos ou lajes. Por outro lado, as medidas de fluxo também podem ser subestimadas, devido à falta de fluxo advectivo induzido pela pressão exercida pela edificação sobre o solo, variação de temperatura e a presença de sistemas de ventilação eventualmente instalados nas estruturas que irão compor a futura edificação, dentre outros fatores.

c) Falta de previsibilidade com relação a pontos preferenciais para intrusão de vapores em edificações: Em muitas edificações, especialmente as mais antigas, as zonas mais permeáveis normalmente estão localizadas na junção entre o pé da fundação e a laje/piso (ou seja, próximo às paredes) ou de conduítes (por exemplo, linhas de serviço público, utilidades subterrâneas e tubulações) projetando-se através das paredes ou lajes. Como os formatos usuais das câmaras de fluxo não permitem medições em tais locais, existe a preocupação de que os valores medidos sejam inferiores aos fluxos reais existentes nestas situações.

d) Representatividade das condições de fluxo de ar no interior de ambientes fechados: As condições de fluxo de ar dentro de uma câmara de fluxo podem não corresponder às condições de fluxo de ar em um ambiente fechado. Se o fluxo de ar no ambiente fechado for pequeno, os fluxos poderão ser reduzidos. Se as condições de fluxo de ar na câmara forem mais altas do que no ambiente fechado, os fluxos medidos poderão ser superestimados, caso seja criada uma orientação ascendente ou, subestimada, se o fluxo no interior da câmara for descendente, empurrando o ar para subsuperfície.

Observados os cenários mais propícios e as limitações para a aplicação da técnica, deve-se selecionar o método mais adequado para realizar as medições com a utilização de câmaras de fluxo. Atualmente, existem duas abordagens para realização de medições utilizando câmaras de fluxo:

- ✓ Câmara de fluxo estática (fechada) e;
- ✓ Câmara de fluxo dinâmica.

Ambos os métodos oferecem vantagens e desvantagens, conforme descrito a seguir.

Câmara de fluxo estática: Conforme descrito por Hartman (2003), durante a aplicação deste método não há introdução de gás na câmara durante o período de amostragem. Os contaminantes em fase vapor fluem naturalmente para o interior da câmara e permanecem estagnados. Amostras discretas para análise são retiradas no final do período de estabilização ou, de preferência, em intervalos regulares de tempo durante o período de amostragem.

Essencialmente, a câmara representa um pequeno ambiente fechado, com a exceção de que não ocorrem trocas de ar, o que fornece uma amostra integrada no tempo, semelhante a uma amostra coletada em um *canister*, durante um período de tempo específico.

O esquema de amostragem, conforme ilustrado na Figura 1, é simples, consistindo essencialmente em um contêiner com portas de amostragem, onde são acoplados os equipamentos para coleta das amostras, selecionados de acordo com o procedimento analítico que será utilizado para determinação das concentrações dos analitos (ex.: *canisters*, seringas, tubos recheados com resinas absorventes, seringas, *TedLar Bags*, etc.). As câmaras podem ser construídas com a utilização de diversos materiais, desde que estes sejam inertes, não absorventes e com a menor quantidade possível de rugosidades e partes ásperas, tais como aço inoxidável polido, acrílico e vidro.

Figura 1 - Câmara de fluxo estática com *canister* acoplado na porta de amostragem, pronto para coleta.



Fonte: Modificado de ENTECH Instruments (2018).

Este método oferece diversas vantagens operacionais em relação a utilização de câmaras de fluxo dinâmicas, incluindo:

- a) Os equipamentos e procedimentos são simples e menos onerosos permitindo a implantação de várias câmaras em um mesmo período de tempo, oferecendo uma melhor cobertura do local/edificação investigada;
- b) O método fornece uma amostra integrada no tempo, por longos períodos, refletindo quaisquer variações de fluxo existentes em função de efeitos temporais;
- c) O sistema e os procedimentos relativamente simples, minimizam a probabilidade da ocorrência de possíveis falsos positivos;
- d) A ausência de fluxo de entrada e saída de gases minimiza possíveis distúrbios das condições de fluxo natural (ex.: geração de gradientes de fluxo advectivo ou de pressão no interior da câmara);
- e) O método é mais sensível (ou seja, pode detectar fluxos mais baixos), pois não há gás de entrada diluindo a concentração de contaminantes no interior da câmara, ocorrendo o acúmulo de concentrações ao longo do tempo;
- f) Os limites de detecção analítica aumentam, permitindo medições menos onerosas, incluindo a aplicação de técnicas de medições em tempo real, realizadas em campo;
- g) Limites mais altos de detecção reduzem o potencial de falsos positivos;
- h) A interpretação dos valores medidos é relativamente mais simples.

As concentrações medidas podem ser comparadas diretamente aos níveis-alvo ou valores aceitáveis para exposição ao ar interno e/ou ao fluxo de vapores, utilizando-se as seguintes relações escritas nas Equações 1 e 2:

Equação 1

$$C_{\text{ambiente fechado}} = \frac{C_{\text{câmara}} * H_{\text{câmara}}}{H_{\text{ambiente fechado}}}$$

Equação 2

$$Fluxo = \frac{C_{\text{câmara}} * V_{\text{câmara}}}{A_{\text{câmara}} * T}$$

Onde:

C = concentração

H = Altura

V = Volume

A = Área

T = Tempo de amostragem

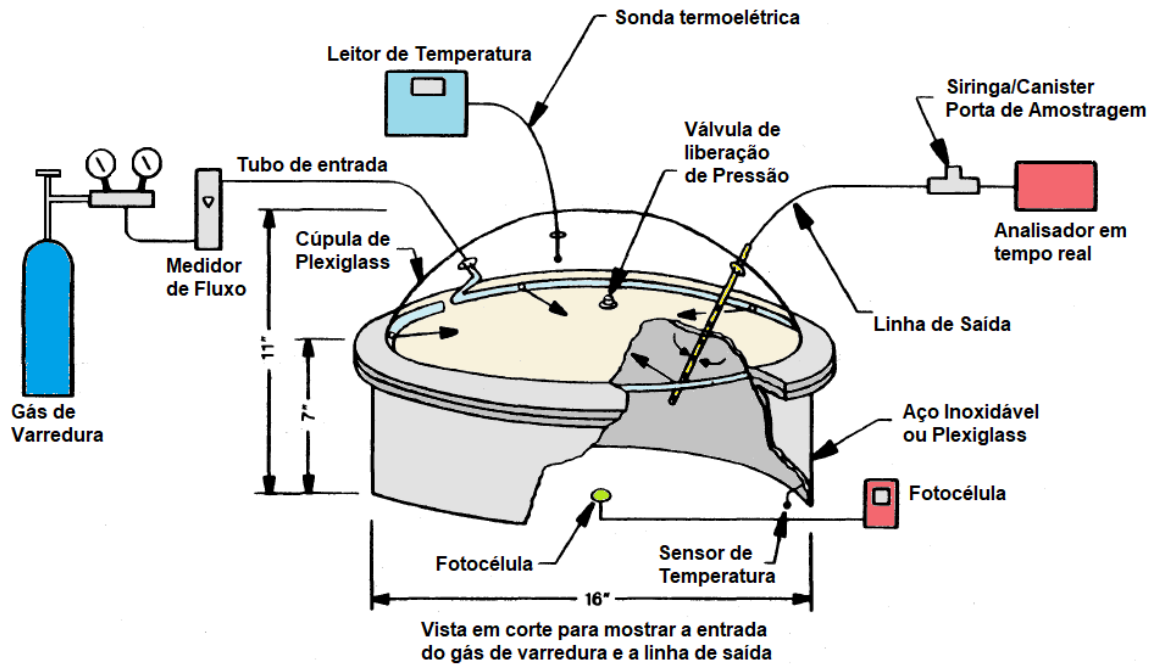
Entretanto, existe uma grande desvantagem quanto ao uso do método estático, visto que, se as concentrações na câmara acumularem uma fração significativa da concentração presente em subsuperfície, o fluxo de contaminantes poderá ser impedido. Segundo a lei de Fick, o fluxo está diretamente relacionado ao gradiente de concentração. Por exemplo, uma redução de 20% no gradiente de concentração levará a uma redução de 20% no fluxo. Para locais onde se sabe que as emissões são elevadas (ex.: próximo a aterros sanitários), a redução de fluxo causada pelo acúmulo de concentração pode ser significativa. Porém, para a maioria das aplicações, o aumento esperado para as concentrações não é significativo.

Qualquer redução de fluxo, pode ser medida, identificada e corrigida, medindo-se a periodicamente a concentração na câmara, durante o período de amostragem.

Se os níveis de detecção laboratoriais necessários puderem ser alcançados é recomendável o uso de laboratórios móveis para permitir a obtenção de um *feedback* em tempo real. Como alternativa, diversas amostras podem ser coletadas a partir da câmara durante o período de amostragem para análises laboratoriais externas. Se a concentração medida na câmara estiver em uma faixa inferior a 25% da concentração determinada em amostras subsuperficiais de vapores no solo, é possível que o fluxo medido tenha sido subestimado.

Câmara de fluxo dinâmica: Este método foi inicialmente descrito no Guia do Usuário da Radian (KIENBUSCH, 1986). Neste método, um gás de entrada (gás de varredura) é continuamente introduzido na câmara de fluxo durante o período de amostragem e, uma quantidade equivalente do gás da câmara é liberada, conforme o diagrama de corte ilustrado na Figura 2, onde pode ser visualizado o esquema de montagem de uma câmara de fluxo dinâmica e os equipamentos para monitoramento normalmente utilizados em campo durante o procedimento de amostragem.

Figura 2 - Diagrama em corte ilustrando o esquema de montagem de uma câmara de fluxo dinâmica e os equipamentos de suporte utilizados durante o procedimento de amostragem.



Fonte: Modificado de Kienbusch (1986).

Presume-se que o sistema atinja uma concentração em estado de equilíbrio após quatro ou cinco tempos de permanência na câmara, onde um tempo de permanência é igual ao volume da câmara dividido pela taxa de fluxo do gás de varredura. Quando atingida a condição de equilíbrio, a concentração de contaminantes no gás liberado deve ser equivalente à concentração existente no interior da câmara.

A concentração no gás liberado é monitorada com um medidor portátil ou a partir de análises químicas, dependendo do limite de detecção necessário para a avaliação que está sendo realizada. Para aplicações baseadas em risco, que requerem baixos limites de detecção, a abordagem típica consiste na coleta de uma amostra de lote do gás de saída para análise laboratorial, após o estabelecimento das condições de equilíbrio (aproximadamente 30 minutos, segundo descrito por KIENBUSCH (1986)).

A principal vantagem que esse método oferece com relação a utilização de câmaras estáticas é de que, exceto nos casos mais extremos, há pouca chance de a concentração da câmara acumular uma fração significativa da concentração de subsuperfície devido ao fluxo de entrada e saída do gás de varredura. Portanto, há muito pouca chance de que o fluxo medido seja impedido pelo acúmulo de concentração no interior da câmara. Entretanto, a utilização de câmaras dinâmicas apresenta diversas desvantagens operacionais e técnicas, tais como:

- a) Este procedimento mais complexo requer o emprego de equipamentos mais sofisticados. Além da câmara, o equipamento necessário inclui tanques de gás, reguladores de fluxo, conexões, tubulações, manômetros e recipientes de amostragens maiores, normalmente equipados com bloqueadores de fluxo;
- b) O potencial de falsos positivos é maior do que no método estático, especialmente quando o equipamento for reutilizado no mesmo local e no mesmo dia;
- c) O equipamento mais sofisticado e oneroso limita a implantação de várias câmaras, para maior cobertura espacial e também de longos períodos de tempo, de forma simultânea;
- d) A alta diluição do volume na câmara, devido a utilização do gás de varredura, resulta em uma perda de sensibilidade em um fator de 60 a 500 em relação às câmaras estáticas, exigindo limites de detecção mais baixos para realização das análises laboratoriais;
- e) Todo o equipamento deve ser esterilizado e os procedimentos de campo devem ser conduzidos com muito cuidado;
- f) A comparação direta da concentração medida na amostra coletada com as concentrações aceitáveis tabuladas para ambientes internos não é possível, e o procedimento para conversão dos resultados é complexo;
- g) O gás de varredura cria uma perturbação no fluxo natural (ex.: criação de fluxo advectivo no interior na câmara). Na aplicação típica desse método, não há medida do fluxo de ar liberado a partir das portas de saída. Sem esta medição, não existem dados ou controle para determinar a direção do fluxo do gás de varredura, seja pelas portas de saída ou pelo fundo da câmara. Como o ar segue o caminho de menor resistência, é razoável esperar que uma parte do ar escape pelo fundo da câmara, dependendo do coeficiente de permeabilidade do solo;
- h) Caso este cenário se configure, pode haver uma resistência ao fluxo natural. As medições de pressão, que geralmente são realizadas para resolver esse problema, não fornecem uma indicação da direção do fluxo e, portanto, não resolvem a incerteza;
- i) Outra grande desvantagem desse método é a sua limitação para medir quaisquer variações temporais ao longo do dia, devido a premissa da existência de um fluxo constante (condições de equilíbrio) no interior da câmara. Os estudos de caso documentam claramente que as emissões a partir do solo variam ao longo do dia, e mesmo o relatório Radian reconhece que este fator limita a aplicação do método. Como o tempo de permanência do ar na câmara é muito curto, uma amostra discreta coletada no final de um período de amostragem reflete apenas os últimos 30 minutos, apesar da duração do período de amostragem. Esta limitação pode ser eliminada se uma fração do gás de varredura for coletado continuamente na porta de saída durante um período de amostragem mais longo.

III. Conclusões

Conforme resumo apresentado acerca das câmaras de fluxo, é possível concluir que essa ferramenta pode auxiliar sobremaneira na avaliação dos cenários de intrusão de vapores, quando a mesma possibilita:

- a) determinar a concentração potencialmente proveniente de vapores acumulados sob as edificações,
- b) reduzir os efeitos da interferência de fontes externas na coleta de amostras de ar ambiente,
- c) subsidiar o cálculo do fator de atenuação, e
- d) permitir maior precisão e reduzir incertezas na definição de riscos à saúde humana.

Entre as duas formas de se usar as câmaras, verifica-se que a câmara de fluxo estática (fechada) apresenta algumas vantagens em relação a câmara de fluxo dinâmica, dentre as quais menor custo de implantação, o uso de menos equipamentos e acessórios, menor interferência durante o procedimento de coleta, e a possibilidade de instalar mais de uma câmara possibilitando maior abrangência espacial e temporal das amostragens.

É fato que toda técnica de investigação apresenta suas vantagens e desvantagens, e devem ser consideradas quando realizadas as investigações para avaliação de intrusão de vapores, considerando na interpretação dos resultados todas as incertezas e imprecisões associadas à técnica.

Dada a necessidade de se investigar com mais profundidade os cenários de intrusão de vapores, devem ser iniciadas pesquisas científicas específicas com essa ferramenta, visando determinar procedimentos específicos, visando normatizar seu uso, adaptado às realidades brasileiras, pois toda e qualquer ferramenta pode e deve ser utilizada para subsidiar: (i) a proteção dos receptores aos riscos de inalação de vapores, (ii) maior precisão na avaliação de riscos à saúde humana, (iii) conhecer os mecanismos de transporte e destino dos vapores provenientes do solo para o interior de edificações, (iv) possibilitar o cálculo de fator de atenuação específico para a área estudada, e (v) permitir a criação de um banco de dados brasileiro com dados sobre este cenário e que possibilite o uso pelas esferas regulatórias e fiscalizadoras.

IV. Referências

ENTECH INSTRUMENTS (Califórnia). **Soil Gas: Sampling Solutions**. 2018. Disponível em: <<https://www.entechinst.com/featured-products/Soil-Gas-Monitoring-Solutions/Chameleon>>. Acesso em: 30 out. 2018.

HARTMAN, Blayne. How to Collect Reliable Soil-Gas Data for Upward Risk Assessments: Part 2: Surface Flux-Chamber Method. **Lustline Bulletin**. New England, p. 14-34. ago. 2003.

JOHNSON, P. C.; ETTINGER, R. A.. Heuristic Model for Predicting the Intrusion Rate of Contaminant Vapors into Buildings. **Environmental Science & Technology**, Houston, v. 25, n. 8, p.1445-1452, 1991.

KIENBUSCH, M. R.. **Measurement of Gaseous Emission Rates from Land Surfaces Using An Emission Isolation Flux Chamber: Users Guide**. Austin: US EPA, 1986. 58 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils**. United States of America: United States Environmental Protection Agency, 2002. 53 p.