

Artigo

Simulações Multifásicas por Fluidodinâmica Computacional como Suporte ao Planejamento de Emergências com Agentes Químicos

Marinho, I. V. B.; Pinto, J. C.; Nogueira, E. S.*

Rev. Virtual Quim., 2014, 6 (3), 795-814. Data de publicação na Web: 9 de março de 2014

<http://www.uff.br/rvq>

Multiphase Computational Fluid Dynamics Simulation as a Tool for Planning Emergencies with Chemical Agents

Abstract: Numerical simulations provided by fluid dynamic studies have been widely used as effective tools to determine the physical behavior of flows in different situations and geometries. The dispersion of hazardous chemicals gases constitutes one of these branches. In this work, computational fluid dynamics (CFD), combined with dose-response probit functions, is used as a tool for evaluation of environmental risk analysis. The main objective pursued is the integration among the various fields that are responsible for preparing the preliminary design environment and the protective or corrective measures. Given the importance of the proposed approach, coupled with the realization of major world events in Brazil such as 2014 World Cup and 2016 Olympics, the fact that the country is not immune to the actions of terrorist groups, the present study shows the importance of the integration proposed for minimization of harmful effects in case of occurrence of undesirable events.

Keywords: OPCW; CFD; Multiphase; emergency response; Chemical Weapons.

Resumo

As simulações numéricas relacionadas ao estudo da dinâmica dos fluidos são amplamente utilizadas como uma maneira eficaz para determinar o comportamento físico dos escoamentos nas mais diversas situações e geometrias consideradas. A dispersão de gases de produtos químicos perigosos no ambiente é um dos ramos desses estudos. Dentro deste contexto emprega-se neste trabalho, a fluidodinâmica computacional (CFD), aliada às funções de dose-resposta tipo probit, como ferramenta para análise de risco ambiental, com o objetivo de auxiliar a integração entre os diversos ramos responsáveis pela elaboração prévia do projeto do ambiente e das medidas protetivas ou corretivas em casos de estudos de situações de emergência. Considerando a importância da abordagem proposta e a inserção do Brasil nos quadros de realização de grandes eventos mundiais, como a Copa do Mundo de 2014 e a Olimpíada de 2016, em que o País não estará imune à ações eventuais de grupos terroristas, mostra-se a importância da integração proposta para minimização dos efeitos danosos sobre as pessoas no caso da ocorrência de eventos indesejados.

Palavras-chave: CFD multifásico; resposta a emergências; armas químicas.

* Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia Química, Divisão de Ensino e Pesquisa, Praça General Tibúrcio 80, 22290-270, Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

✉ evandro.nogueira@mct.gov.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20140048](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20140048)

Simulações Multifásicas por Fluidodinâmica Computacional como Suporte ao Planejamento de Emergências com Agentes Químicos

Ilmar Victor M. Barbosa,^a José Carlos C. Pinto,^b Evandro S. Nogueira^{a,*}

^a Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia Química, Divisão de Ensino e Pesquisa, Praça General Tibúrcio 80, 22290-270, Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

^b Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Química, Cidade Universitária, CP 68502, Centro de Tecnologia, Sala G-115, CEP 21941-972, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

* evandro.nogueira@mct.gov.br

Recebido em 8 de março de 2014. Aceito para publicação em 8 de março de 2014

1. Introdução

- 1.1. Terrorismo químico
- 1.2. Avaliação de risco aplicada ao terrorismo
- 1.3. Fluidodinâmica computacional como fator de prevenção
- 1.4. Segurança ambiental

2. Os Modelos de Fluidodinâmica computacional (CFD)

- 2.1. Escoamentos multifásicos
- 2.2. Dispersão ambiental e CFD
- 2.3. Análise de risco e CFD

3. Aplicação ao planejamento de emergências – estudo de caso

4. Considerações finais

1. Introdução

1.1. O terrorismo

O mundo está sujeito a eventos danosos de toda natureza, cujas consequências podem alcançar patamares devastadores, tanto para o ambiente como para as pessoas. Tais eventos podem ser oriundos ou não da

ação humana, demonstrando a possível vulnerabilidade ou não de medidas governamentais e sociais concernentes à sua mitigação.

Muitas das ações adversas não podem ser controladas, como no caso de eventos oriundos da natureza. Contudo, é possível estabelecer um processo de antecipação de ocorrências por intermédio da análise das vulnerabilidades e das ameaças a que o sistema está sujeito. Dessa forma é possível

desencadear ações de prevenção, preparação, resposta e possibilitar uma estrutura que torne possível a recuperação da área afetada. Portanto, um conjunto de procedimentos governamentais e privados pode ser concebido ao menos para o restabelecimento da normalidade.

Nesse contexto, o terrorismo pode ser visto como uma ação humana complexa que pode apresentar diversas definições, ainda não uníssonas no cenário mundial. A definição estabelecida pelas Nações Unidas trata o terrorismo como "o conjunto de atos criminosos contra um Estado destinado ou calculado para criar uma forma de terror nas mentes das pessoas, em particular, de grupos ou o público em geral".¹ Os EUA, por sua vez, definem o terrorismo de várias formas, destacando-o como o "conjunto de ações que compreendem o uso ilegal da força ou da violência contra pessoas ou bens para intimidar ou coagir, visando à consecução de objetivos políticos ou sociais".¹ Já o Reino Unido define o terrorismo como "o uso da violência para fins políticos, que inclui qualquer uso da violência com a finalidade de colocar o público ou qualquer parte do público com medo".¹

Mesmo sem ter sido alvo direto do terrorismo ou jamais ter tido seu território utilizado como palco para uma ação dessa espécie, o Brasil não deixou de receber reflexos sob as ondas de choque produzidas pelas últimas grandes ações terroristas perpetradas no mundo.² De fato, especialistas da área são enfáticos quando afirmam que o Brasil não está livre de ataques terroristas.³ Na atualidade, o terrorismo pode ser visto como um fenômeno global e o Brasil, apesar de não parecer ser o local mais provável para esse tipo de ação, deve ser encarado como potencial alvo, não sendo possível esquecer que eventos dessa natureza já ocorreram em países da América Latina e continuam a ocorrer. De fato, é possível destacar a ocorrência de um ataque terrorista a um centro judaico em Buenos Aires, no começo dos anos 90. Em particular, a globalização é um fenômeno, cuja característica de abertura

de fronteiras, expõe mais o País ao perigo, não o livrando, portanto, desse risco.⁴

Desta forma, é essencial desenvolver planejamentos de contingências eficazes, com base em ferramentas capazes de propiciar o máximo de informações sobre as ameaças à segurança pública, a influência das instalações físicas, dos ventos, do público e da própria natureza do problema físico envolvido. Neste sentido a fluidodinâmica computacional (CFD) pode oferecer subsídios confiáveis que possibilitem a realização de análises de risco detalhadas de cenários críticos em termos de probabilidade de ataques terroristas, de forma a minimizar as eventuais perdas de vidas humanas e econômicas na eventualidade de um ataque.

O terrorismo vem se estabelecendo como a principal ameaça à paz mundial, principalmente depois dos atentados de 11 de setembro de 2001 às Torres Gêmeas, nos EUA. O episódio acentuou marcadamente o descontrole do mundo contemporâneo, ampliando o raio de ação da violência anteriormente circunscrita predominantemente ao Oriente,⁵ abrindo um novo rumo na História da Humanidade. Por isso mesmo, o tema constitui motivo suficiente para mobilizar atenções e preocupações de todos os países envolvidos na causa comum da segurança internacional.⁶

Diante dessas vulnerabilidades, o conhecimento e a antecipação por parte das autoridades, principalmente, podem exercer um elevado poder de neutralização ou dissuasão dos resultados pretendidos pelos terroristas. Em Tóquio, transcorridos pouco mais de 15 anos do mais grave atentado ocorrido no Japão após a Segunda Guerra Mundial, o ex-chefe da polícia do país, Takaji Kunitatsu, afirmou que as autoridades receberam uma denúncia anônima de que a seita Aum Shinrikyo estaria planejando uma ação daquela magnitude em resposta às investigações que os religiosos sofriam na ocasião. Caso as autoridades tivessem levado a denúncia realmente a sério, a polícia poderia ter evitado ou minimizado o número de vítimas.⁷

1.2. Avaliação de risco aplicada ao terrorismo

Acerca da abrangência do risco imposto pelos eventos do 11 de setembro, Habermas⁸ afirma que o terrorismo torna a identificação do adversário e a estimativa realista dos riscos virtualmente impossíveis. Para isso, torna-se necessário estabelecer uma diferença entre o que vem a ser o ataque terrorista propriamente dito e a ameaça decorrente dessas ações que, em função do evento ocorrido em solo americano, se tornou um evento de cunho universal.

O risco pressupõe uma sociedade que tenta ativamente romper com seu passado, gerando diferentes dilemas e tensões que se infiltram na vida cotidiana, nas estruturas social, política, econômica e nas instituições em geral, tumultuando seus fundamentos, suas bases, comprometendo seu funcionamento, gerando incertezas e confundindo seus integrantes.⁹ Posicionar o Brasil nessa contextualização é mostrar que, diante do almejado crescimento econômico e da escolha para sediar eventos de importância internacional, o País se encontra preparado para minimizar, dissuadir e até mesmo neutralizar as mais diversas ações que atentem contra a segurança das pessoas, particularmente as que envolvem terrorismo. Dessa forma, pretende-se, também, salvaguardar a imagem do Brasil perante a comunidade internacional como um centro detentor de capacidade para enfrentar este tema com medidas científicas adequadas.

A economia mundial está crescendo hoje à uma taxa em torno de 4% ao ano, de modo que o terrorismo não teve a capacidade de interromper essa trajetória de crescimento em longo prazo, o que leva a maioria dos estudiosos do assunto à conclusão de que o impacto maior almejado, do ponto de vista do terrorismo, não é macroeconômico, mas setorial. Sendo assim, certos setores da economia sofrem mais diretamente o impacto, como no caso do transporte aéreo, da indústria de turismo, da indústria de

seguros e do setor tecnológico.¹⁰

A mídia mundial envia lembretes diários sobre a possibilidade de ocorrência de eventos terroristas. Em dezembro de 2010, diversos canais de comunicação noticiaram pela internet a preocupação de parte das autoridades brasileiras a respeito da possibilidade de o País se tornar alvo potencial de ataques terroristas durante a realização dos referidos eventos mundiais. O fato foi prontamente negado pelo Ministério das Relações Exteriores (MRE) brasileiro, o que evitou a disseminação dos temores que cercam a possibilidade de prática de atos dessa natureza, principalmente durante as Olimpíadas de 2016.

Como ocorre com outros crimes, o terrorismo não vai desaparecer, e encontra-se em franco desenvolvimento e aperfeiçoamento em todo o mundo.¹¹ O País deve, portanto, considerar, fortemente, a possibilidade de ter que enfrentá-lo, ainda que apenas com medidas de prevenção. A utilização de armas não convencionais para fins terroristas não constitui atualmente somente uma simples teoria, mas uma realidade que não pode ser ignorada pelas nações.

1.3. Fluidodinâmica computacional como fator de prevenção

Várias são as metodologias que podem ser empregadas favoravelmente para a prevenção e a preparação de respostas a ataques com agentes não convencionais em ambientes de grande circulação de pessoas e em eventos de importância internacional, como os que o Brasil se propõe a sediar futuramente. Dentro do contexto de segurança nacional citado anteriormente, é fundamental que se desenvolvam pesquisas que tornem possível mensurar de forma mais precisa os riscos inerentes às ações terroristas em locais públicos que possam constituir alvos de ataques. Nessa linha, as ferramentas de simulação computacional por

CFD, quando aliadas às metodologias de avaliação de segurança ambiental e de probabilidade de risco, parecem formar um sistema adequado para o estabelecimento de condutas ou procedimentos pelas autoridades responsáveis, auxiliando no planejamento dos aludidos eventos.⁴

Simulações por CFD têm dado importantes contribuições para análises de conforto e de segurança ambiental em diversas áreas do conhecimento. Particularmente, deve-se observar que experimentos, especialmente em grande escala, frequentemente têm um alto custo e não podem ser realizados por questões óbvias de segurança. Nesses casos, os estudos por CFD são especialmente relevantes.

O aumento da velocidade de processamento com computadores de alto desempenho tem ainda possibilitado a realização de simulações por CFD para cenários realistas de avaliação de acidentes, com precisões mensuráveis.¹²

O planejamento e a preparação antecipados para atender situações de risco ou de emergência envolvendo ataques com agentes perigosos podem ser apresentados como uma alternativa bastante eficaz para a redução dos efeitos promovidos sobre os seres humanos e o ambiente. Estudos por CFD podem complementar o aprimoramento do domínio do conhecimento das potenciais ameaças ao evento, o que pode direcionar a adoção de procedimentos de resposta a emergências mais adequados. Essas ferramentas e os conceitos de análise de risco e seu devido gerenciamento empregados adequadamente podem auxiliar nos estudos da metodologia presentes em normas próprias para situações de crise, estabelecendo novos rumos voltados à proteção da vida humana.

1.4. Segurança Ambiental

No âmbito da literatura brasileira a expressão “meio ambiente” aparece de

forma redundante e confusa, não sendo, portanto, a mais adequada, porque os termos meio e ambiente são palavras sinônimas.¹³ O termo meio significa “lugar onde se vive, com suas características e condicionamentos geofísicos”; já o ambiente é “aquilo que cerca ou envolve os seres vivos ou as coisas”. O termo “segurança ambiental”, por sua vez, surge com o alargamento do conceito de segurança promovido no início dos anos 80. A primeira vez em que a noção de segurança ambiental emergiu como um novo conceito foi em um relatório publicado em 1982 pela Comissão Independente sobre Questões de Desarmamento e Segurança (CISD), presidida pelo ex primeiro ministro Sueco Olof Palme, em que se fez uma distinção entre “segurança coletiva” e “segurança comum”. O termo segurança coletiva se relaciona com a segurança voltada ao relacionamento entre os Estados e abarca conceitos como os de aliança e dissuasão. A segurança coletiva se relaciona com a cooperação para fazer face aos problemas globais e aos problemas relacionados com o futuro da humanidade e a sua sobrevivência. O relatório da Comissão Palme considerou as várias ameaças à segurança comum que incluem, além das ameaças militares, diversos tipos de ameaças classificadas como não militares, como as relacionadas com os problemas econômicos, o crescimento demográfico e a destruição do ambiente.¹⁴

Em 1952, a Assembleia Geral da ONU, por meio da Resolução 502 (VI) de janeiro de 1952, criou a Comissão de Desarmamento das Nações Unidas (UNDC) sob o Conselho de Segurança, com um mandato geral sobre questões de desarmamento. A primeira sessão especial da Assembleia Geral dedicada ao desarmamento, em 1978, estabeleceu a UNDC como um órgão subsidiário da Assembleia, composta por todos os Estados membros das Nações Unidas.¹⁵

A UNDC foi criada como um órgão deliberativo, com a função de analisar, fazer recomendações sobre várias questões no campo do desarmamento e acompanhar as decisões e recomendações relevantes da

sessão especial. O órgão tem ainda a finalidade de executar trabalhos na área de desarmamento e segurança internacional para regulamentação dos mais diversos armamentos dispostos em todo mundo, tratando também de temas relacionados ao desarmamento e suas influências na segurança internacional e nas relações entre os povos, como o desarmamento e a não proliferação de armas leves e de pequeno calibre, armas químicas, biológicas, a questão do uso do espaço para fins militares e o terrorismo.¹⁵

Ao final dos anos 1990, com o reconhecimento do fenômeno da mudança climática e da velocidade de perda de biodiversidade, o conceito de segurança ambiental foi expandido para englobar um leque mais amplo de ameaças e vulnerabilidades, tanto dentro dos Estados como internacionalmente. Na verdade, essas ameaças à segurança ambiental sempre estiveram presentes, embora o seu reconhecimento dentro de uma agenda ampliada de segurança manifesta em uma nova era de diálogo e ação constituía um marco a ser considerado.¹⁶

Interessa, com base no exposto acima, o ambiente artificial a ser estudado, por ser o construído, alterado ou influenciado pelo ser humano. O ambiente artificial é aquele constituído pelos edifícios urbanos, que são os espaços públicos fechados, e pelos equipamentos comunitários, que são os espaços públicos abertos, como as ruas, as praças e as áreas verdes. Embora esteja mais relacionado ao conceito de cidade, o conceito de ambiente artificial abarca também a zona rural, referindo-se especificamente aos espaços habitáveis, visto que nele os espaços naturais cedem lugar ou se integram às edificações urbanas artificiais, consolidando a ação transformadora do homem.¹⁷

Em decorrência do conceito e da limitação do tipo de ambiente, o atendimento a critérios de segurança e de higiene se apresenta fundamental para a prevenção dos diversos tipos de acidentes ou crises. Nesse contexto, a segurança ambiental é a

necessidade de estabelecer um conjunto de medidas voltadas à proteção do próprio ambiente contra a ocorrência de determinados eventos danosos. Esse talvez pareça um conceito amorfo, mas constitui provavelmente uma noção mais simples do que vem a ser segurança nacional.¹⁷

As ameaças à segurança ambiental exigem mecanismos eficientes para a prevenção, preparação e resposta, notadamente as que se dirigem às necessidades humanas e de saúde, tais como doenças, secas, inundações e furacões (ou seja, eventos da natureza de grandes proporções catastróficas), a poluição industrial e a degradação ambiental. Devem também ser considerados segurança e bem-estar humanos em situações de conflitos, fome e escassez de recursos naturais.¹⁷

Sob o ponto de vista das relações internacionais, a segurança ambiental é considerada como sendo um conceito essencialmente contestado,¹⁸ em função do fato de que o seu significado não é um dado ontológico, mas sujeito a mudanças ao longo do tempo.¹⁹ Por não apresentar significado constante, seu conceito significa algo diferente para cada tradição nos estudos de segurança.

Desta forma, a segurança ambiental diz respeito à manutenção do local, da região e da biosfera planetária como o sistema de apoio essencial a todas as ações que dependem da condução da vontade humana. Os cinco setores de segurança (militar, político, econômico, social e ambiental) não operam isoladamente. Cada um define um ponto dentro da problemática de segurança e uma forma de ordenar as prioridades e pontos relevantes, mas todos se entrelaçam em uma teia de fortes ligações.¹⁸ Sendo assim, a segurança ambiental se apresenta como um tema de importância, não só no contexto mundial, mas também para aplicação imediata e particular e para o tratamento de situações em que pessoas ou o ecossistema se encontrem em situações de perigo, tal como se pretende estudar neste trabalho.

2. Os Modelos de Fluidodinâmica computacional (CFD)

Modelos de CFD estabelecem soluções numéricas para o conjunto de equações diferenciais parciais que governam um determinado problema de escoamento. Para a modelagem de dispersão de gás em um ambiente as equações que governam o escoamento incluem os balanços de massa, de energia e de quantidade de movimento para cada componente. Todas as equações devem ser discretizadas em um domínio computacional adequado, onde as equações algébricas resultantes devem ser resolvidas.

Dentre os vários campos da ciência e da tecnologia, as contribuições da simulação computacional parecem particularmente promissoras no século XXI como base para a evolução da tecnologia, segurança, vida social e conservação ambiental.²⁰

Atualmente, as técnicas de CFD constituem ferramentas capazes de prover soluções adequadas para problemas de avaliação de risco, substituindo modelos resultantes de situações particulares, como os que envolvem dispersão de gás em geometrias regulares. O aumento da velocidade das CPU tem proporcionado a solução de problemas de escoamento em ambientes com geometrias complexas, fornecendo previsões confiáveis a respeito das influências físicas e químicas nos problemas de dispersão de gases sobre obstáculos.²¹

Dentre as principais vantagens da aplicação das técnicas de CFD, em detrimento de ensaios experimentais, pode-se citar a redução do tempo de desenvolvimento, a maior flexibilidade das condições experimentais, a simulação de condições de operação críticas e de difícil realização experimental, a redução de custos e o maior nível de detalhamento e volume de informações sobre o sistema.

2.1. Escoamentos multifásicos

Os escoamentos multifásicos são aqueles que apresentam uma interface definida entre duas ou mais fases que se deslocam com velocidade relativa entre si. As fases podem ser contínuas ou dispersas. Essa classe de escoamento normalmente é descrita em termos de valores médios para as fases contínuas e de distribuições de tamanho para os sistemas dispersos.²²

Uma fase se refere ao estado sólido, líquido ou vapor em que se encontra a matéria. Um escoamento multifásico é o fluxo de uma mistura de fases, tais como gases (bolhas) em um líquido ou de líquido (gotas) em gases, e assim por diante.²² Pode-se classificar os sistemas multifásicos por meio da topologia do escoamento, no sentido da continuidade ou não da interface entre as fases, dividindo-os em disperso, estratificado ou misto. Os escoamentos dispersos são os que apresentam uma fase constituída de elementos discretos, tais como gotas em um gás ou bolhas em um líquido. Os sistemas estratificados apresentam todas as fases escoando com a formação de uma interface contínua entre elas, de maneira que nenhuma fase se apresenta dispersa. Os sistemas multifásicos mistos se apresentam tanto como uma interface semi-contínua quanto como partículas em suspensão em uma ou mais fases.²³

Escoamentos multifásicos são importantes na maior parte das aplicações industriais. Nestas aplicações, estão incluídos os processos de conversão de energia, fabricação de papel e aplicações médicas e nucleares. Muitos sistemas de combustão envolvem escoamentos diluídos multifásicos, como os “sprays” de gotas líquidas em combustor de turbina a gás de alta velocidade e os escoamentos em tubos recheados.²⁴

A compreensão dos escoamentos físicos em que mais de uma fase está envolvida oferece problemas de complexidade muito maior do que o encontrado em escoamentos monofásicos. As razões desta complexidade

são relacionadas ao fato de que as fases não se misturam uniformemente e que interações de pequena escala entre as fases podem ter profundos efeitos sobre as propriedades macroscópicas do fluxo.²⁴

Apesar do aumento da capacidade dos recursos computacionais, os escoamentos multifásicos estão distantes de serem simulados com generalidade e precisão. Pode-se prever que diante da manutenção do controle de todas as interfaces e aplicação das condições de contorno adequadas em um fluxo de gás-líquido industrial ainda não será possível alcançar essa precisão em um futuro próximo com o arcabouço numérico disponível hoje.²⁴

O aumento na utilização de ferramentas de simulação para escoamentos multifásicos depende, portanto, da criação de modelos de superfície de interface que representem com mais fidelidade a complexidade em torno da física que acontece nessa região. Esse é um tópico de pesquisa muito explorado na literatura,²⁴ tanto na física fundamental como na análise teórica das forças que agem nas interfaces.

No caso da dispersão de agentes químicos na atmosfera, uma série de trabalhos da literatura tem utilizado técnicas de CFD para a modelagem da dispersão de nuvens de agentes químicos no ambiente utilizando modelos multicomponente ou multifásicos.²²⁻²⁴

2.2. Dispersão ambiental e CFD

Modelos de dispersão descrevem o transporte de materiais gasosos pelo ar. Os processos físicos de maior interesse em dispersões gasosas são o transporte, a mistura turbulenta, o efeito da força da gravidade e a possível mudança de fase.¹²

Nuvens de gases tóxicos podem ser causadas por uma variedade de eventos, incluindo emissões acidentais em instalações industriais, acidentes durante o transporte de materiais perigosos e ataques envolvendo

agentes de guerra química. Quando uma nuvem tóxica aparece, uma medida de proteção usual é a utilização de abrigo em um prédio até que a nuvem se extinga. A evacuação envolveria exposição à liberação tóxica.

A dispersão de gás na atmosfera pode ser estudada com o uso de diferentes métodos de simulação implementados num código de CFD. Esses métodos incluem o estudo de escoamentos com um único componente, multicomponentes ou multifásicos. Por exemplo, a definição de variáveis adicionais pode ajudar na modelagem do transporte de um material passivo no escoamento como fumaça no ar. A presença de uma variável adicional não afeta o escoamento, apesar de algumas das propriedades poderem ser definidas como dependentes de variáveis adicionais. No modelo de escoamento multicomponente, admite-se que diferentes componentes de um fluido são misturados em nível molecular, partilhando a mesma velocidade média, pressão e campos de temperatura. Além disso, esta abordagem de transferência de massa considera que o transporte ocorre por advecção e difusão. Em situações mais complexas, onde diferentes componentes são misturados em grandes escalas com campos de velocidade e de temperatura separados, o método multifásico pode ser usado.²⁵

Quantidades consideráveis de gases tóxicos e inflamáveis são comumente usadas em muitos tipos de instalações industriais. Muitos gases perigosos são armazenados e transportados em granel em forma líquida e sob pressão, usualmente na temperatura atmosférica ou refrigerados até o ponto de ebulição, representando um risco grave ao público na hipótese de possíveis lançamentos acidentais dessas substâncias.²⁶

O perfil da dispersão de um material na atmosfera em função de um vazamento ou derramamento seguido de evaporação em um ambiente é determinado pelo transporte de "*momentum*" e pela força da gravidade. Se o transporte de "*momentum*" predomina, o fluido pode formar um jato ou spray, no

caso de existirem gotículas da substância, que é o caso de dispersões de agentes químicos de guerra; e se as forças gravitacionais predominam, forma-se uma pluma. No entanto, se a dispersão, dominada pelo transporte de "*momentum*" ou pela força da gravidade, diminui de intensidade, a turbulência atmosférica passa a ser o fator predominante.²⁷

A dispersão aérea do agente químico de guerra sarin, que resulta em gotículas líquidas de diferentes tamanhos, foi estudada com ferramentas de CFD por Kukkonen e colaboradores.²⁸ Esses autores verificaram que as gotas maiores podem se depositar

junto ao ponto de lançamento, causando a contaminação do solo enquanto que as gotas menores podem permanecer em suspensão como um aerossol, formando uma nuvem chamada primária, que pode ser transportada pelo ar ao longo de distâncias consideráveis. A vaporização de líquidos contaminantes no solo constitui a chamada nuvem secundária. Para um agente químico persistente a contaminação do solo predomina, enquanto que para os agentes voláteis, a maior parte dos contaminantes permanece na nuvem primária. A Figura 1 ilustra esses processos.²⁸



Figura 1. Esquema de dispersão e disseminação de um agente químico na atmosfera

2.3. Análise de risco e CFD

Atualmente a sinergia do CFD com a arquitetura para a análise de dispersão de gases, faz-se necessária e presente em razão do alto custo dos estudos experimentais e das limitações das abordagens analíticas. Esses estudos indicam um conhecimento prévio multidisciplinar, no qual se incluem as questões de conforto (ergonomia) e energia, como aspectos fundamentais e inerentes a esse contexto mais amplo da implementação da sustentabilidade.²⁹ Por outro lado, para que se possa desenvolver um conhecimento

mais abrangente da arquitetura sustentável, outros temas como geração e economia de energia, reciclagem e reuso de recursos, transportes, e poluição de águas e solos também fazem parte do processo. Nesse ponto, mais uma vez, fica claro o caráter multidisciplinar dessa abordagem, que deve ser extensiva ao próprio ensino da Arquitetura.²⁹

Pontiggia e colaboradores³⁰ estudaram o lançamento de amônia em áreas urbanas abertas, utilizando o pacote computacional Fluent e o modelo monofásico de turbulência $\kappa - \epsilon$ de duas equações, importando

geometrias complexas 3D para os bancos de dados topográficos. Tal estudo permitiu detalhamento da geometria de todas as construções presentes em um ambiente urbano real. Como a magnitude das consequências depende da dosagem absorvida (que depende da concentração e do tempo de exposição) uma metodologia simples para a avaliação da dose foi desenvolvida e implementada em um código de CFD que permite a estimativa das regiões com diferentes probabilidades de morte. As simulações numéricas não foram utilizadas para criar nem tampouco criticar planos de contingência.

Chen e colaboradores³¹ empregaram o pacote comercial CFD Fluent para estudo de colocação de sensores de agentes de guerra química e biológica, utilizando a abordagem monofásica e a modelagem clássica de turbulência com o intuito de oferecer alerta precoce da presença de substâncias perigosas contaminantes.

Na esteira da preocupação com a segurança dos seres humanos, Barret e Adams³² realizaram estudos para o desenvolvimento e aplicação de um sistema integrado de modelagem para estimação de fatalidades após a liberação intencional de 17 toneladas de cloro a partir de um caminhão tanque em uma área urbana genérica. Um modelo de resposta pública específica local e ações de resposta da população também foram estudados. Simulações previram formação de uma nuvem de cloro. O modelo de dispersão atmosférica previu espalhamento da nuvem com a troca de ar simulando o movimento da substância a partir do lado exterior de edifícios. Com uma velocidade estável do vento de 2,5 m/s, estimaram-se entre 4.000 (metade dentro de 10 minutos) e 30.000 mortes (metade dentro de 20 minutos), dependendo do modelo de dose-resposta usado. Barret e Adams³² também consideraram tempos compatíveis com o que os bombeiros empregam em emergências, não tendo empregado ferramenta computacional de CFD para os cálculos de mortalidade.

O entendimento do fenômeno de transporte e distribuição de agentes contaminantes pelo ar no interior de construções é essencial para abordar questões como a qualidade do ambiente e do ar. A análise da exposição do ser humano a gases tóxicos nos ambientes de trabalho torna possível a proteção da população em relação à emissão do produto e permite também o planejamento da resposta aos acidentes, evitando mortes em espaços confinados e permitindo o controle de infecções em dispersões biológicas.³³

Em trabalho recente Hincal e colaboradores³⁴ apresentam uma abordagem abrangente sobre produtos químicos industriais tóxicos mostrando a vulnerabilidade a que está sujeito o mundo nos dias atuais, pelo distanciamento da guerra convencional e ameaça cada vez mais crescente dos conflitos assimétricos. O estudo destaca que, durante a segunda metade do século XX, numerosos incidentes químicos ameaçaram as populações civis e o ambiente em várias partes do mundo, em razão de suas propriedades perigosas. Com toxicidade muito menor do que os agentes químicos de guerra, compostos químicos perigosos têm essa característica compensada, quando liberados no ambiente em grandes quantidades.³⁴

Cai e colaboradores³⁵ estudaram o lançamento de contaminantes em ambiente fechado, utilizando a ferramenta de CFD. Eles aplicaram um novo conceito chamado de fator de eficiência da fonte contaminante (EFCS), com o intuito de avaliar os retornos da ventilação e as estratégias de evacuação. Um procedimento de tomada de decisões com base nesses modelos foi proposto e demonstrado por estudos numéricos de 100 cenários com 10 modos de ventilação, 2 modos de evacuação, e 5 locais de origem. Os resultados mostraram que os modelos podem ser úteis para dirigir a tomada de decisões tanto acerca da ventilação quanto das estratégias de evacuação, com enfoque na segurança do ambiente.

Nesse cenário, a conscientização e

reconhecimento de potenciais ameaças são os primeiros requisitos para mitigar e prevenir riscos para a saúde pública resultantes da exposição a essas substâncias. Essa tarefa deve ser realizada por uma autoridade central, que determina as medidas e procedimentos fundamentais e coordena as aplicações em todo o país dos procedimentos de análise e avaliação de riscos, de preparação, de planejamento e de resposta, em caso de emergência envolvendo exposição a agentes químicos.³⁵

Modelos de vulnerabilidade são "os modelos matemáticos utilizados para estimativas das áreas potencialmente sujeitas aos efeitos físicos dos eventos acidentais, que relacionam a intensidade dos fenômenos físicos (como radiação térmica, sobrepressão e concentração de nuvem tóxica) com a

quantidade de recursos comprometidos (que podem ser materiais, econômicos, naturais ou humanos). Para tanto, utiliza-se com frequência o modelo de vulnerabilidade de Eisenberg,³⁶ desenvolvido pela Guarda Costeira dos Estados Unidos, que faz uso de funções probabilísticas do tipo dose-resposta (probit).

Quando ensaios toxicológicos são realizados em um grande número de indivíduos, todos expostos à mesma dose (integral da concentração no tempo, durante o tempo de exposição), obtém-se, então, o perfil que representa a fração ou percentual de indivíduos que podem vir a experimentar uma resposta específica, tendo tipicamente a forma de uma Gaussiana, conforme mostra a Figura 2.³⁷

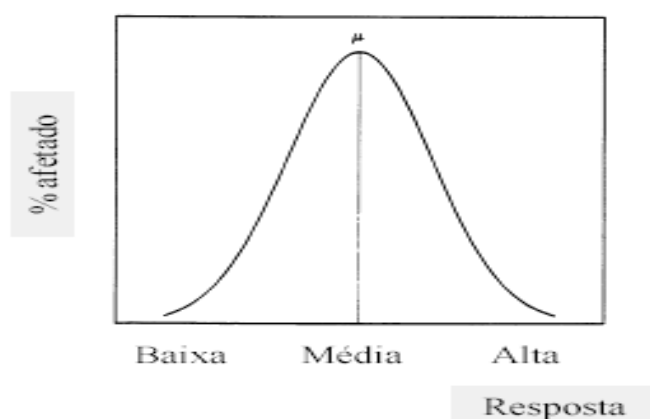


Figura 2. Percentual de indivíduos afetados versus resposta³⁷

Esse método é definido como uma variável aleatória com média 5 e variância 1. O valor do probit é relacionado a uma determinada porcentagem através de curvas ou tabelas de distribuição de probabilidades.

O Modelo de Eisenberg³⁶ utiliza as funções do tipo probit (uma unidade de probabilidade

adimensional Y) que pode ser calculada pela Equação 1, com a e b sendo os parâmetros chamados de constantes de probit. L_p (ou D) é a variável independente chamada de variável causal ou dose, que representa a associação a um produto ou circunstâncias específicos para riscos considerados.

$$L_p = D = \int_{t_0}^t \Phi^n(t) dt$$

Eq. 1

onde L_p (ou D) representa a concentração letal acumulada em um intervalo de tempo e Φ é o efeito perigoso.

$$Y = a + b \cdot \ln(D) \quad \text{Eq. 2}$$

A variável probit (P_r) está relacionada com a probabilidade, segundo a equação 3.

$$P_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad \text{Eq. 3}$$

onde P_r é a chance de ocorrência do sinistro e, por isso descreve a probabilidade acumulada de ocorrência de letalidade ao longo do tempo de exposição.

Por essas equações serem relacionadas a análises probabilísticas, os resultados devem transformar a relação $Y - D$ em probabilidade de o dano ocorrer em determinada situação. A Tabela 1 apresenta uma leitura simples da Figura 3 e das Equações 1 a 3. Nas linhas estão as probabilidades expressas em dezenas; nas colunas estão as unidades. O ponto de encontro entre linha e coluna é o valor de Y . Por exemplo, no encontro entre a linha 50% e a coluna 4, aparece o número 5,10. Isso significa que a probabilidade acumulada de $Y = 5,10$ é igual a 54%.³⁸

Tabela. 1. Conversão de probits em porcentagem³⁹

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,87	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	5,92	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
%	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

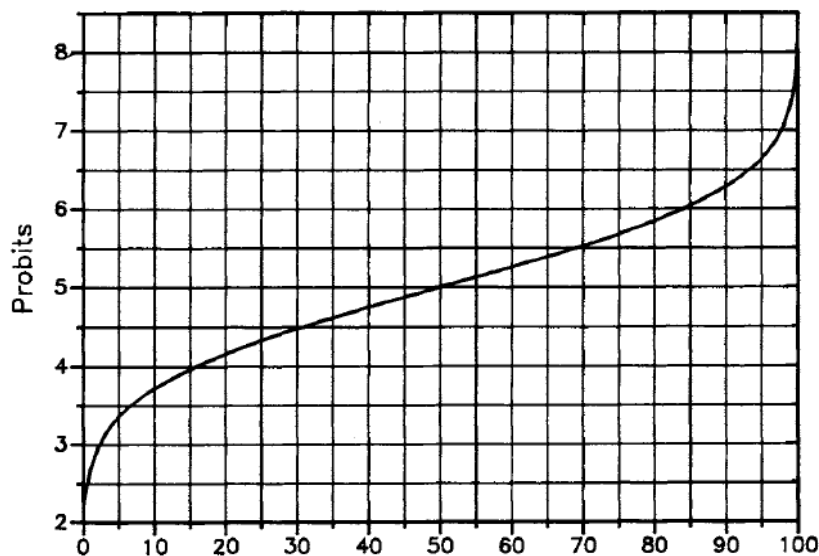


Figura 3. Relação entre porcentagens e probits³⁷

Modelos que representam os efeitos tóxicos de substâncias químicas são utilizados para avaliar as consequências para a saúde humana como um resultado à exposição a uma concentração conhecida de gás tóxico, por um período conhecido de tempo, proporcionando a adoção de medidas mitigadoras ou ação evasiva.

Avaliações de risco envolvendo agentes químicos conhecidos ou potenciais agentes de guerra química, para os militares, exigem o conhecimento da toxicidade correspondente. Como essas avaliações não podem ser realizadas diretamente, dada à letalidade dos agentes químicos, as dosagens dessas substâncias tóxicas sobre os seres humanos devem ser extrapoladas a partir de experimentos de toxicidade com animais. Para as contaminações por inalação, a toxicidade é normalmente expressa em LC_{50} , definida anteriormente como a concentração do produto capaz de levar ao óbito 50% de uma população ou certo público-alvo em um período de 24 h.

No trabalho de Zhang e Chen⁴⁰ são citados alguns grandes acidentes com liberação de gases tóxicos que demonstram a necessidade urgente de desenvolver um método sistemático de análise de riscos para os indivíduos expostos a esse evento. Isso pode ser feito por meio de uma combinação entre

simulação numérica por CFD e abordagem de modelo de dose-resposta para análise quantitativa de exposição aguda a essa ameaça. Zhang e Chen⁴⁰ propuseram, então, uma metodologia em 4 etapas, cuja síntese se concentra no estabelecimento de um modelo CFD (Fluent) para calcular a dose tóxica, de acordo com a concentração de gás e tempo de exposição, para a estimativa esperada de fatalidades. Eles estudaram um vazamento de sulfeto de hidrogênio de uma estação de recolhimento de gás. Contudo, não abordaram a integração de ações de resposta de emergência com os resultados obtidos das funções tipo probit, limitando-se a sugerir rotas de fuga a partir do lançamento de gás, considerando os pontos críticos levantados. Uma proposta natural de melhoria desta metodologia reside em integrar as ferramentas de CFD, análise de risco, resposta a emergências e ações de evacuação.

3. Aplicação ao planejamento de emergências – estudo de caso

Nas últimas décadas, em decorrência das atividades industriais, foi registrado um grande número de acidentes, cujas

consequências apresentaram-se danosas às populações situadas nas proximidades dos empreendimentos. Esses acidentes ganharam visibilidade devido aos impactos negativos apresentados, ocasionados pela perda de vidas e danos ao meio ambiente, somando-se ainda as perdas materiais. A abrangência dessas perdas chega muitas vezes a afetar a economia de maneira global. Essa situação gerou diversos desdobramentos, como a elaboração e adoção de medidas e regulamentações legais que procuram combater os efeitos e a ocorrência de acidentes nas indústrias, motivados principalmente por ações coordenadas por movimentos organizados.⁴¹

A base de toda administração de desastres assenta-se sobre a elaboração de documentos chamados de planos de emergência, que servem como guia para que os organismos públicos e privados lidem com os efeitos decorrentes de determinado cenário, estabelecendo procedimentos, definindo recursos materiais e capital humano.⁴²

O “National Institute for Occupational Safety and Health” (NIOSH),⁴³ por exemplo, elaborou um plano de ações de resposta que se dirige a um público alvo que inclui os proprietários, os gerentes e o pessoal de manutenção de edifícios públicos, privados e governamentais, os escritórios, os laboratórios, os hospitais, as lojas, as escolas, os terminais de transporte e os locais públicos, como, por exemplo, estádios esportivos, shopping centers e coliseus. As instalações de maior risco, como instalações industriais, instalações militares, sistemas de metrô e instalações policiais, estão fora do escopo desse guia, pois requerem considerações especiais. A ocorrência desse tipo de evento geralmente é difícil de ser prevista, não existindo uma fórmula específica para determinar o nível de risco de um determinado edifício, exigindo dos seus proprietários ou responsáveis a adoção de medidas direcionadas à redução dos riscos químico-biológico-nucleares (QBN).

Outro aspecto importante na prevenção é aumentar a dificuldade para a introdução de um agente de QBN no ambiente considerado, ampliando a capacidade de detecção dos intentos terroristas antes mesmo que eles concretizem a liberação do agente, por meio de planos de incorporação e procedimentos para mitigação dos seus efeitos. Os detalhes do planejamento de emergência, preparação e resposta podem ser complexos, pois devem ser considerados os recursos, equipamentos e informações de uso geral do ambiente.

O objetivo geral da preparação para emergências envolve a redução de danos, como, por exemplo, a exposição ao evento danoso (que pode ser por meio da contaminação radioativa, dispersão de um agente químico no ambiente, explosões etc.), direcionada às pessoas envolvidas nas operações, ao público em geral e ao próprio ambiente. Deve ser considerada a prevenção da propagação dos efeitos do agente e a restauração às condições normais do local do acidente. A preparação para emergências também fornece uma garantia razoável de que as ações necessárias serão tomadas para mitigar as consequências da liberação QBN.⁴⁴

Neste cenário, o controle ambiental da dispersão de materiais perigosos em áreas de concentração humana constitui uma preocupação constante na avaliação e redução do risco industrial, cuja complexidade passa pela densidade populacional existente nesses locais, as geometrias complexas dos escoamentos, os tipos de agente dispersos no ambiente, os fatores climáticos e os fatores geográficos que influenciam fortemente esse tipo de fenômeno.³⁰

Neste trabalho, as simulações implementadas ilustram o uso do CFD para analisar os perfis de velocidade, pressão e concentração de um vazamento de um gás em um extrato do ambiente da atual Arena HSBC (Figura 4), na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro. Esse prédio foi palco de eventos esportivos durante os Jogos Pan-Americanos de 2007.



Figura 4. Foto aérea noturna do HSBC Arena na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro⁴

A Figura 5 mostra o detalhe da área referente aos 3º e 4º andares, analisados no presente trabalho. A passagem do público

nos corredores considerados é obrigatória no caso de acionamento do plano de emergência.

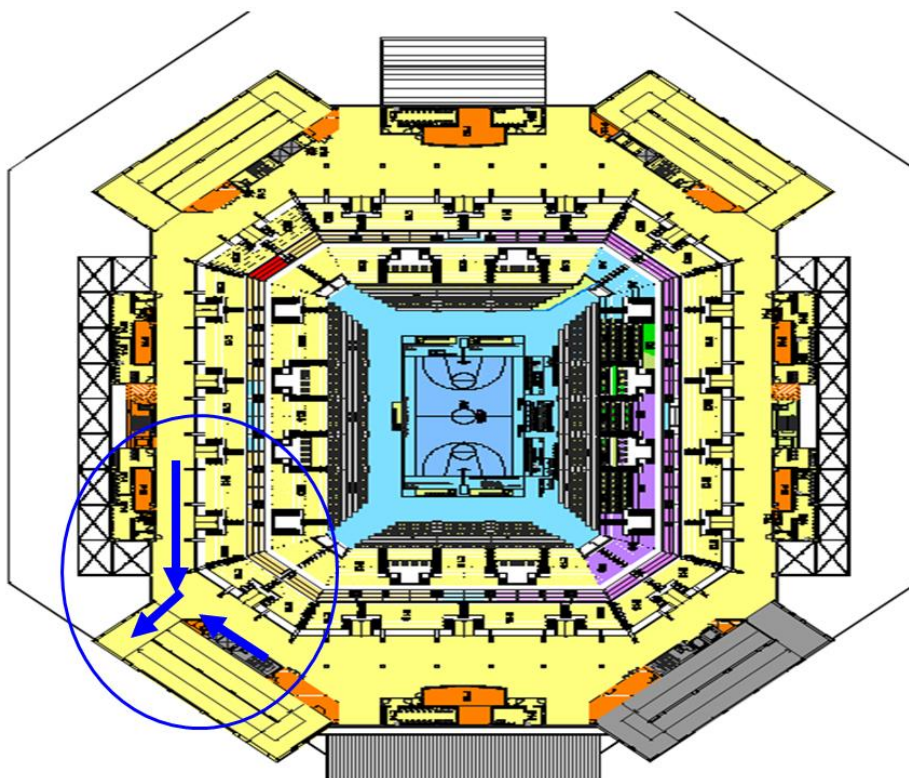


Figura 5 - Uma das rotas de escape do HSBC Arena, Rio de Janeiro⁴

A arena multiuso do Rio, como seu próprio nome indica, foi projetada como um local apropriado para abrigar eventos variados, incluindo modalidades de atividades esportivas olímpicas em recinto fechado e lá foram realizadas as competições de basquete e de ginástica artística durante os Jogos Panamericanos de 2007.

A arena possui arquibancadas móveis para permitir o aumento de sua capacidade de 13 para 15 mil espectadores. Ocupa 50 mil metros quadrados de área construída, comportando um número de pessoas

bastante relevante para uma ação de resposta a emergências. A arena conta ainda com quatro conjuntos de rampas, uma em cada canto do prédio, e o acesso é feito por meio de uma passarela. Além disso, é totalmente climatizada, com temperatura ambiente de 25 °C, ponto este que corrobora a hipótese de escoamento isotérmico. A Figura 6 mostra a evolução da dosagem tóxica de uma nuvem de sarin na arena ao longo do tempo de simulação multicomponente tridimensional ao longo dos primeiros 30 segundos de escoamento.

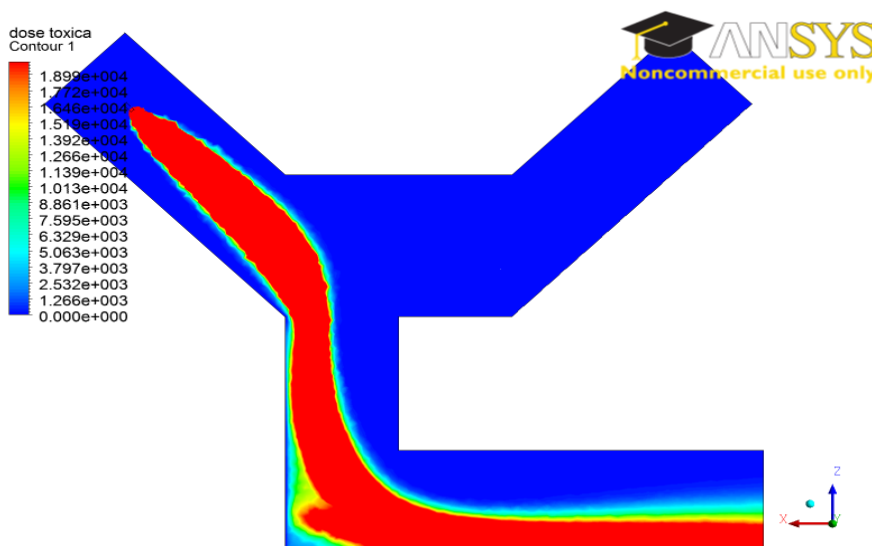


Figura 6. Visão superior do plano cota 1,1 m com a dosagem tóxica acumulada de sarin, com brisa de 1m/s no intervalo de tempo de 60 segundos⁴

Olhando-se os perfis para a dosagem tóxica acumulada, verifica-se a assimetria acentuada no desenvolvimento da “pluma” de agente químico nas doses a que estariam sujeitas as pessoas que se evadissem do local, apenas em função da escolha do caminho pelo qual se deslocariam. Vê-se que há uma situação de agravamento da dosagem tóxica pelo caminho preferencial estabelecido próximo à parede do corredor de saída.

Observando-se o perfil de letalidade ilustrado pela Figura 7, percebe-se que o lado

mais contaminado é justamente o lado preferencial de deslocamento em caso de evacuação no sentido indicado. As pessoas mais próximas à parede estariam sujeitas à LCt₅₀ por mais tempo, sem se darem conta da situação. Tal fato ainda levaria as autoridades a adotarem medidas errôneas, pela simples dedução de que essas vítimas estariam sofrendo os efeitos do possível pânico, simplesmente, quando, na realidade, o evento danoso ocorreu em outras dimensões.

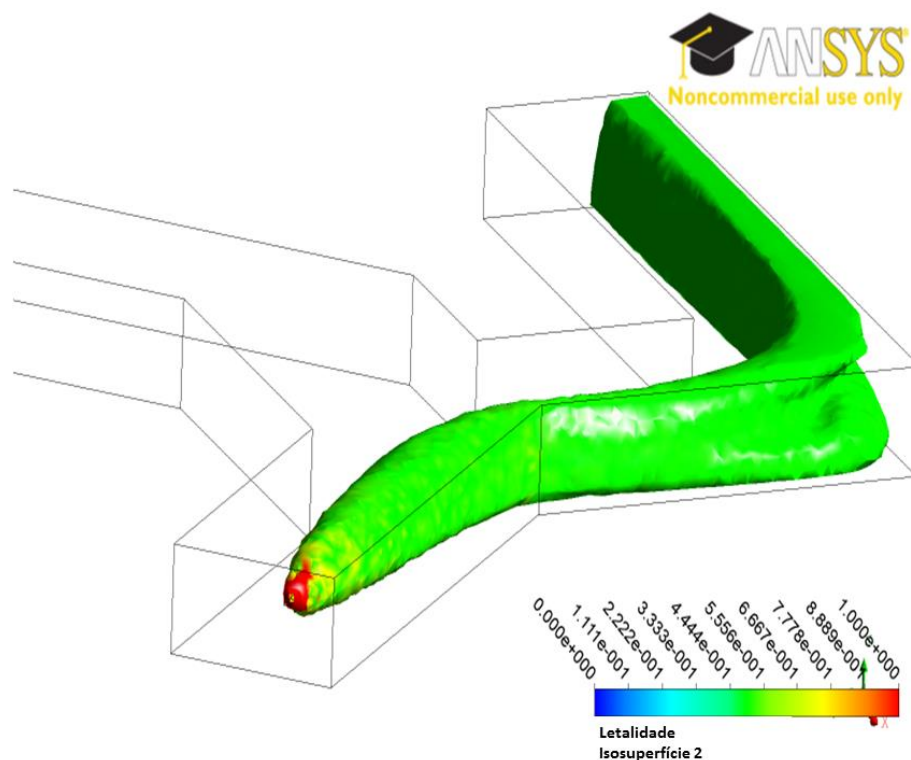


Figura 7. Grau de letalidade em isosuperfície sem exaustor em 60 segundos de lançamento do contaminante⁴

Desta forma, verifica-se que as simulações de CFD mostram que a arquitetura das saídas induz um perfil assimétrico de dispersão da nuvem de contaminante, o que pode ser utilizado em planos de contingência no sentido de orientar o escape das pessoas pelo lado menos suscetível à ação do contaminante. Deve-se observar que esta simples ação poderia reduzir drasticamente o número de baixas no caso de um incidente real com gás tóxico. Da mesma forma, os perfis obtidos com as simulações multifásicas pode orientar a colocação de sensores de forma a possibilitar um alarme prévio no caso de uma ação terrorista.

4. Considerações finais

O Brasil tem se destacado no cenário internacional como sede de grandes eventos em sequência. Neste cenário, torna-se um alvo compensador para diversos atores externos não estatais com novos desafios ao

estabelecimento de um sistema de resposta a emergências e à elaboração de planos de contingência em diferentes e diversos cenários espalhados por um país de dimensões continentais.

Neste contexto, o uso de ferramentas científicas para o desenvolvimento de estudos de risco e a elaboração de planos de contingência podem ser de grande utilidade para a otimização de recursos, planos de escape e a redução do risco associado à ataques com agentes químicos. Tais ferramentas não devem ser negligenciadas pelos agentes públicos sob o risco de levar à perdas desnecessárias de vidas em eventos reais que possam vir a ocorrer.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência e Tecnologia e ao Exército Brasileiro pelo apoio prestado à elaboração deste trabalho

Referências Bibliográficas

- ¹ Aly, A.; Green, L. Fear, Anxiety and the State of Terror. *Studies in Conflict & Terrorism* **2010**, *33*, 268. [CrossRef]
- ² Buzanelli, M. P. Introdução. En: Encontro de estudos: Terrorismo, II., 2004, Brasília. Distrito Federal: Gabinete de Segurança Institucional; Secretaria de Acompanhamento e Estudos Institucionais. Disponível em: <http://geopr1.planalto.gov.br/saei/images/publicacoes/terrorismo_final.pdf>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ³ Lesser, I. O. O novo terrorismo. *Revista Veja on-line*, ed. 1718, 19 set. 2001. Entrevista a Eduardo Salgado. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/190901/entrevista.html>>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ⁴ Barbosa, I. V. M. *Tese de Doutorado em Química*, Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia, 2012.
- ⁵ Sugahara, T. Y. L. Dissertação de mestrado em Relações internacionais. Universidade Estadual Paulista, 2008.
- ⁶ Saei. I., II Encontro de estudos: TERRORISMO, II, Brasília. Distrito Federal: Gabinete de Segurança Institucional; Secretaria de Acompanhamento e Estudos Institucionais. Disponível em: <http://geopr1.planalto.gov.br/saei/images/publicacoes/terrorismo_final.pdf>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ⁷ Capellari, H. Japão: polícia sabia do atentado de 1995. Disponível: <<http://humbertocapellari.wordpress.com/2010/03/page/2/>>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ⁸ Habermas, J.; *A constelação pós-nacional*. Littera Mundi: São Paulo, 2001.
- ⁹ Nogueira, M A. Bem mais que pós-moderno: poder, sociedade civil e democracia na modernidade periférica radicalizada. *Ciências Sociais Unisinos* **2007**, *43*, 46.
- ¹⁰ Ricúpero, R. Exposição Inicial: Possíveis implicações econômicas de ações terroristas. em: Encontro de estudos: Terrorismo, 2005, Brasília. Distrito Federal. Gabinete de Segurança Institucional; Secretaria de Acompanhamento e Estudos Institucionais, Disponível em: <<http://geopr1.planalto.gov.br/saei/images/publicacoes/livroterrorismo.pdf>>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ¹¹ Harris, J. L. A review of "Disturbed: terrorist behavioral profiles". *Conflict & Terrorism*, **2010**, *33*, 464. [CrossRef]
- ¹² Wilkening, H.; Baraldi, D.; Heitsch, M. CFD simulations of light gas release and mixing in the BMC with CFX. *Nuclear Engineering and Design* **2007**, *238*, 618. [CrossRef]
- ¹³ Farias, T. Q. O conceito jurídico de meio ambiente. Em: *Âmbito Jurídico*, Rio Grande, 35, Disponível em: <http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=1546>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ¹⁴ Cunha, L. V. *Segurança ambiental e gestão dos recursos hídricos*. in: *Congresso da Água*, IV, Lisboa, 17.p., 1998. Disponível: <<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/c11.pdf>>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ¹⁵ Site da ONU – Organização das Nações Unidas. Disponível em <<http://www.un.org/disarmament/HomePage/DisarmamentCommission/UNDiscom.shtml>>. Acessado em 12 de janeiro de 2013.
- ¹⁶ Hulme, K. *Environmental security: implications for international law*. Yearbook of International Environmental Law, 2008.
- ¹⁷ Brito, F. A. A. *A hodierna classificação do meio ambiente, o seu remodelamento e a problemática sobre a existência ou a inexistência das classes do meio ambiente do trabalho e do meio ambiente misto*. Em: *Âmbito Jurídico*, Rio Grande, 36. Disponível em: <http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=1606>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ¹⁸ Buzan, B. New patterns of global security in the twenty-first century. *International Affairs* **1991**, *67*, 431. [CrossRef]
- ¹⁹ Waeber, O. Peace and security – two involving concepts and their relationship. In: Analysis and Copenhagen Peace Research. S. Guzzini and D. Jung eds. Routledge: Londres, 2004.

- ²⁰ Kobayashi, T. Large eddy simulation for engineering applications. *Fluid Dynamics Research* **2006**, *38*, 84. [CrossRef]
- ²¹ Pontiggia, M.; Derudi, M.; Rota, R. Hazardous gas dispersion: a CFD model accounting for atmospheric stability classes. *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, *171*, 739. [CrossRef]
- ²² Crowe, C. T. Multiphase flow handbook. 1. ed. CRC Press, 2006.
- ²³ Nogueira, E. S. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- ²⁴ Maliska, C. R.; Silva, A. F. C.; Rezende, R. V. P.; Georg, I. C. Interface forces calculation for multiphase flow simulation. Em: Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Multifásico Líquido-Gás, Florianópolis, 2008.
- ²⁵ Kashi, E.; Shahraki, F.; Rashtchian, D.; Behzadmehr, A. Effects of vertical temperature gradient on heavy gas dispersion in build up area. *Iranian Journal of Chemical Engineering (IChE)* **2009**, *6*, 26. [Link]
- ²⁶ Kukkonen, J. PhD Thesis, The Finnish Society of Sciences and Letters, 1990.
- ²⁷ Lees, F. P. Loss Prevention in the process industries - hazard identification, assessment and control. 2a. ed. Butterworth-Heinemann: Oxford, 1996.
- ²⁸ Kukkonen, J.; Riikonen, K.; Nikmo, J.; Jäppinen, A.; Nieminen, K. Modelling aerosol processes related to the atmospheric dispersion of sarin. *Journal of Hazardous Materials* **2001**, *A85*, 165. [CrossRef]
- ²⁹ Gonçalves, J. C. S.; Duarte, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. *Ambiente Construído* **2006**, *4*, 51. [Link]
- ³⁰ Pontiggia, M.; Derudi, M.; Alba, M.; Scaioni, M.; Rota, R. Hazardous gas releases in urban areas: assessment of consequences. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, *176*, 589. [CrossRef]
- ³¹ Chen, Y. L.; Wen, J. Comparison of sensor systems designed using multizone, zonal, and CFD data for protection of indoor environments. *Building and Environment* **2010**, *45*, 1061. [CrossRef]
- ³² Barrett, A. M.; Adams, P. J.; Chlorine truck attack consequences and mitigation, *Risk Analysis* **2011**, *31*, 1243. [CrossRef]
- ³³ Lee, E.; Feigley, C. E.; Khan, J. An investigation of air inlet velocity in simulating the dispersion of indoor contaminants via computational fluid dynamics. *The Annals of Occupational Hygiene* **2002**, *46*, 701. [CrossRef]
- ³⁴ Hincal, F.; Erkekoglu, P. Toxic Industrial Chemicals (TICs) – chemical warfare without chemical weapons. *Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences* **2006**, *31*, 220. [Link]
- ³⁵ Cai, H.; Long, W.; Xianting, L.; Kong, L.; Xiong, S. Decision analysis of emergency ventilation and evacuation strategies against suddenly released contaminant indoors by considering the uncertainty of source locations. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, *178*, 101. [CrossRef]
- ³⁶ IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Estudo de análise de risco (EAR) do gasoduto do Pará. 2010. Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Dutos/Gasoduto/Gaspar%C3%A1/EAR/2330-00-EAR-RL-0001-00/2330-00-EAR-RL-0001-00.pdf>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ³⁷ Crow, D. A.; Louvar, J. F. Chemical process safety: fundamentals with applications. 1. ed. Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Series: New Jersey, 2002.
- ³⁸ CETESB. Companhia Estadual de Tecnologia Estadual de Saneamento Ambiental. Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos - Norma Técnica P4.261/03. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/Emeg%C3%Aancias-Qu%C3%ADmicas/14-Normas-CETESB-p4261>>. Acesso em: 21 janeiro 2014.
- ³⁹ Finney, D. J. Probit analysis. Cambridge University Press: Cambridge, 1952.
- ⁴⁰ Zhang, B.; Chen, G. Quantitative risk analysis of toxic gas release caused poisoning - a CFD and dose-response model combined approach. *Process Safety and Environmental Protection* **2010**, *88*, 253. [CrossRef]

⁴¹ Silva, C. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.

⁴² Araújo, S. B. Administração de desastres. Sygma. Disponível em: <http://www.defesacivil.es.gov.br/files/pdf/li_vro_administracao_de_desastres_distribuicao_gratis.pdf>. Acesso em: 21 janeiro 2014.

⁴³ Site do National Institute for Occupational Safety and Health. Disponível em: <<http://www.niosh.com.my/v3i/index.php/en/>>. Acesso em: 07 março 2014.

⁴⁴ Yusof, M. W.; Ali, H. M. Radiological emergency: malaysian preparedness and response. *Radiation Protection Dosimetry* **2011**, *146*, 38. [CrossRef]