

Ensaio experimentais para validação de simulações de dispersão de nuvem densa utilizando CFD

Adriana Miralles Schleder e Marcelo Ramos Martins

LabRisco - Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 CEP 05508-030
Cidade Universitária - São Paulo-SP

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial brasileiro e as crescentes exigências da sociedade por níveis de segurança adequados no âmbito industrial faz surgir uma demanda pelo desenvolvimento de medidas de análise, avaliação e gerenciamento do risco associado às atividades industriais. Dentro deste contexto encontram-se os riscos associados ao vazamento de substâncias tóxicas e/ou inflamáveis que podem ocorrer, por exemplo, em instalações de produção de petróleo e gás, em refinarias e outras plantas industriais.

Quando ocorre a liberação acidental destas substâncias, uma nuvem tóxica e/ou inflamável pode ser formada. Modelos de dispersão estimam a evolução e as características da nuvem, tais como concentração, temperatura, velocidade e dimensões em função do tempo e espaço. Tradicionalmente, modelos integrais e empíricos têm sido utilizados em análises de dispersão fornecendo resultados rápidos e confiáveis ao descrever cenários simples (por exemplo, dispersão sobre terreno plano e sem obstruções). No entanto, estes modelos se mostram inadequados para cenários com algum grau de confinamento ou obstrução. Para estes cenários, recentemente, observa-se um crescente uso de métodos numéricos associados a diferentes algoritmos. Esse procedimento é conhecido por dinâmica de fluidos computacional (ou CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) e é encontrado em algumas ferramentas computacionais comerciais como é o caso do ANSYS, FLACS, FLUENT e KFX.

Embora o uso destas ferramentas tenha se mostrado promissor, estudos recentes [1] mostram que os resultados obtidos pelo uso destas ferramentas podem apresentar grande variabilidade. Em simulações CFD, uma ampla gama de parâmetros deve ser definida pelo usuário e tais parâmetros podem afetar significativamente os resultados. Para uma simulação típica o usuário deve selecionar entre outras: variáveis de interesse, modelo de turbulência a ser utilizado, domínio computacional e malha, condições de contorno, métodos de discretização e critérios de convergência. Análises de sensibilidade e estudos de validação foram realizados durante os últimos anos, a fim de fornecer diretrizes sobre como desenvolver estudos de dispersão eficazes utilizando-se ferramentas CFD [2-4], porém para o desenvolvimento destas diretrizes são necessários dados experimentais mais abrangentes.

Existem poucos testes de campo sobre dispersão relatados na literatura e uma quantidade ainda menor que trate de dispersão em ambientes complexos, como por exemplo, com barreiras presentes na área onde a dispersão é esperada. A maioria destes testes foi realizada há décadas atrás, e os dados gerados não são abrangentes o suficiente para uma avaliação exaustiva sobre o desempenho de ferramentas CFD.

A maioria dos testes de campo relatados na literatura consiste em dispersões de gás natural liquefeito (GNL), uma vez que durante as décadas de 70 e 80 um grande esforço foi realizado com o objetivo de se entender o comportamento do GNL quando liberado acidentalmente [5-7]. Mais recentemente, testes envolvendo liberações de GNL sobre água foram realizados por Hanlin [8]. Testes de campo envolvendo outras substâncias são encontrados em menor proporção [9-11].

Entre os testes de campo de dispersão mais utilizados para fins de validação estão a série Falcon e a série Burro, apresentadas por Koopman et al. [6] e Brown et al. [12], respectivamente). Ambos os testes consistiram em liberações de GNL; os testes da série Burro foram realizados em uma área aberta sem obstáculos ao passo que os testes da série Falcon foram realizados na presença de barreiras. Estes testes têm sido amplamente utilizados para a validação de modelos [12-14]. No entanto, é importante notar que os testes foram feitos décadas atrás, quando a capacidade de medição e registro dos equipamentos não era tão abrangente como atualmente e, portanto, os dados disponíveis a partir desses testes são escassos para a execução de um processo completo de validação.

Mais recentemente, o grupo Gaz de France e Associados [16] conduziram experimentos que trataram de dispersões de gás denso em um ambiente com obstáculos. No entanto, o projeto foi focado na análise de incêndios em nuvem e não no fenômeno da dispersão da nuvem; em grande parte das provas, a nuvem foi incendiada alguns segundos após o início da liberação do gás e, portanto, não existem muitos dados sobre a dispersão especificamente. Ainda nos anos 2000, os testes MUST [10], MID05 [11] e MKOPSC [3] foram realizados usando-se gás traçador (os dois primeiros) e GNL. Estes testes foram realizados por um consórcio envolvendo empresas privadas; portanto, apenas uma pequena parte dos dados coletados está disponível para o público através de relatórios publicados, o que dificulta a sua utilização para realização de estudos de validação. Em 2010, os testes Jack Rabbit [17] foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento de uma nuvem gerada por uma grande quantidade de amônia liberada instantaneamente em uma área formada por uma grande depressão no terreno, e embora seja classificado como um teste com obstruções, o cenário é muito restrito uma vez que a obstrução é apenas o resultado da inclinação no terreno [17]. Ainda é importante salientar que os dados publicados na literatura, usualmente, contêm apenas valores de concentrações máximas ou concentrações em um momento específico após liberação. Valores de concentração em função do tempo e espaço são raros na literatura, o que dificulta a execução de estudos de validação de ferramentas CFD para análises de dispersão.

Como visto, existe uma escassez de dados experimentais adequados à validação das ferramentas CFD atuais, portanto, a execução de testes de campo adicionais é necessária. Neste contexto, um projeto conjunto entre a Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) foi criado com o objetivo de executar de testes de campo que forneçam dados adequados para a avaliação do desempenho de ferramentas CFD ao analisar a dispersão de nuvem de substâncias inflamáveis e/ou tóxicas.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Como a revisão da literatura mostra, há uma falta de dados experimentais adequados para a validação do uso de ferramentas CFD para análise de consequências envolvendo dispersão de substâncias inflamáveis e tóxicas. Sendo assim, um projeto conjunto entre a Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) foi recentemente criado para investigar o desempenho de ferramentas CFD ao analisar dispersão de nuvens de substâncias inflamáveis/tóxicas por meio de análises comparativas entre dados experimentais e simulações.

A primeira fase do projeto consistiu na realização de testes de campo, os quais foram realizados no campo de treinamento de bombeiros da empresa Can Padró Segurança & Proteção durante o período de 22 a 25 de julho de 2014. Os testes consistiram em liberações contínuas de gás liquefeito de petróleo (GLP) e posterior monitoramento da dispersão. Onze provas foram realizadas, compreendendo uma quantidade total de GLP liberado de aproximadamente 70 kg. As nuvens formadas foram intensamente monitoradas para se determinar a evolução da concentração no tempo e espaço.

Este artigo contém uma descrição desta fase experimental e fornece resultados preliminares em termos de comparação entre os dados experimentais e simulações usando o software de simulação FLACS [18], que é uma ferramenta CFD desenvolvida especificamente para análise de consequências. O objetivo deste trabalho é apresentar resultados preliminares dos testes de campo executados e sobre o desempenho

da ferramenta CFD para ao simular tais testes, como um exemplo dos potenciais usos dos dados recolhidos durante os testes.

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

3.1 Testes de campo

Os testes de campo consistiram em liberações contínuas de GLP na atmosfera com a subsequente formação de nuvem e seu monitoramento. Sendo a composição do GLP: 97% de propano (em volume), 1,5% de butano e 1,5% de outros gases. Os testes foram intensivamente monitorados e a concentração foi caracterizada em função do tempo e espaço. O GLP foi armazenado em um tanque pressurizado de 4 m³ (pressão de saturação à temperatura ambiente) localizado a aproximadamente 45 m de distância do ponto de liberação, a uma elevação relativa do solo de 15 m. O combustível flui através de uma tubulação de 40 mm de diâmetro com um comprimento total de 50 m até ao ponto de liberação, que localizava-se a 1,5 m de altura.

A pressão e a temperatura foram monitoradas no ponto de liberação por um transdutor de pressão eletrônico (Barksdale, tipo UPA5) e dois termopares tipo K localizadas 0,05 m a montante do orifício de saída. Estes dados foram utilizados para calcular a taxa de vazão mássica e a velocidade do jato no ponto de saída, através da aplicação das relações termodinâmicas e assumindo-se uma expansão isentrópica.

Adicionalmente, com o intuito de monitorar a concentração da nuvem formada, sensores de concentração foram distribuídos em uma área de 700 m² (35 m na direção de liberação e 20 m no sentido transversal). 47 sensores eletroquímicos de oxigênio (modelo 2FO da CiTicel) foram colocadas em 19 diferentes locais dentro da área de descarga em três alturas diferentes: 0,1, 0,6 e 1,3 m (pontos azuis apresentados na Figura 1)

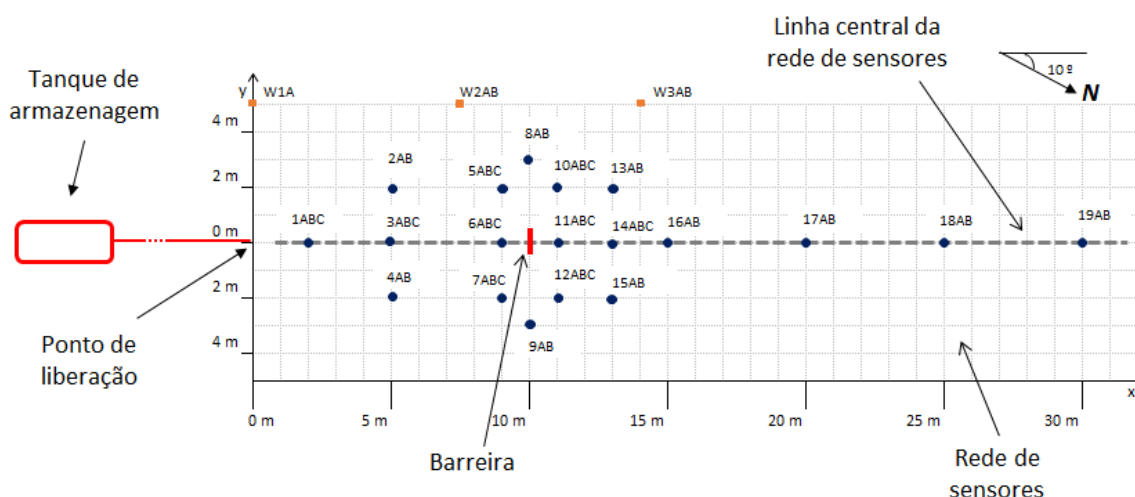


Figura 1 - Arranjo dos testes de campo

Estes sensores fornecem a concentração de GLP de maneira indireta, assumindo-se que qualquer decréscimo da concentração de oxigênio é causado pelo deslocamento do oxigênio pelo vapor de GLP. Os sensores de oxigênio são formados por células galvânicas, que fornecem um fluxo de corrente entre os eletrodos da célula proporcional à concentração de oxigênio presente no local. Assumindo uma concentração de oxigênio na atmosfera igual a 20,9% (em volume) e uma concentração de nitrogênio igual a 79,1%, a concentração de vapor de GPL [LPG_v] pode então ser expressa por:

$$[LPG_v] = 1 - [O_2] - \frac{79,1[O_2]}{20,9} \quad (1)$$

Sendo [O₂], a concentração de oxigênio detectado pelos sensores.

Alguns dos testes foram planejados com o objetivo de analisar a influência de uma obstrução na dispersão; sendo assim, em alguns testes, uma barreira de 1,3 m de altura e 1 m de largura foi colocada perpendicularmente à direção da liberação a 10 m de distância do ponto de liberação.

Adicionalmente, foram utilizados uma estação meteorológica (Vantage Vue sem fio da Davis Instruments) e 5 sensores ultrassônicos de vento (WindSonic OP1 de Gill Instruments) para monitorar as condições meteorológicas. Direção e velocidade do vento foram registradas com uma frequência de 1 Hz; os sensores de vento foram colocadas a 1 m de altura na posição W1A e a 1 m e 2 m de altura e em posições W2AB W3AB (ver Figura 1). A temperatura ambiente e umidade relativa foram obtidas por meio da estação meteorológica. O registro e armazenamento dos dados foi feito a uma taxa de 4 hertz.

Onze provas foram realizadas, com diferentes taxas de vazão e tempos de liberação. No presente artigo a prova P25_3 é apresentada e discutida. Esta prova consistiu na liberação contínua de 6 kg de LPG na presença de uma barreira e sendo a duração da liberação igual a 40 s.

3.2 Simulações

Simulações CFD foram realizadas utilizando-se o software FLACS [18], que é uma ferramenta CFD desenvolvida especificamente para modelagem de consequências. Ele utiliza equações de conservação de massa, energia e momento; resolvendo as equações RANS (do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) baseado no modelo padrão de turbulência k- ϵ de Launder & Spalding [19]. De acordo com HSE [20], a abordagem RANS é amplamente aceita para estudos de engenharia e análise de risco.

Neste artigo apresentam-se resultados preliminares da prova P25_3, cujas condições iniciais usadas para modelagem apresentam-se na Tabela 1. Os valores de temperatura ambiente, a pressão ambiente, umidade relativa e direção e velocidade do vento foram considerados como a média dos valores registrados durante a duração do teste. A rugosidade do solo foi assumida igual a 0,03, que é o valor típico para superfícies de concreto [21]. A classe Pasquill utilizado foi E - ligeiramente estável. No momento dos ensaios, havia uma cobertura de nuvens de cerca de 80% e havia chovido durante 2 horas antes do início dos testes. Esta condição reduziu consideravelmente o calor emitido a partir do solo levando a condição atmosférica à estável.

Tabela 1 - Condições iniciais da prova P25_3

Variável	Unidade	P25_3
Temperatura ambiente	°C	22.5
Pressão ambiente	hPa	993
Umidade relativa	%	86.9
Direção do vento	°	235
Velocidade do vento a 1 m de altura	m·s ⁻¹	0.70
Classe Pasquill	-	E
Rugosidade do solo	m	0.03
Direção da liberação	-	Horizontal
Altura da liberação	m	1.5
Duração da liberação	s	40
Faixa da temperatura na liberação (min/máx.)	°C	-28.41/10.26
Faixa da pressão na liberação (min/máx.)	bar	0.1/1.3
Quantidade de combustível liberada	kg	6.5
Taxa de vazão (min/máx.)	kg·s ⁻¹	0.08/0.39

O domínio de simulação foi discretizado usando um único bloco, definido seguindo as orientações do manual do usuário do software [21][20]. Uma base ortogonal X, Y e Z foi utilizada, sendo o eixo X

horizontal e paralelo à direção da liberação, Y horizontal e perpendicular à direção da liberação e Z vertical. O domínio estende-se 50 m na direção X (a partir de 5 m antes do ponto de liberação até 45 m após o ponto de liberação), 48 m na direção Y (centrados no ponto de liberação) e 10 m na direção Z (a partir do nível do solo). Sendo assim, o ponto de liberação possui as coordenadas (0, 0, 1,5) neste domínio. A malha foi inicialmente formada por cuboides de 1 m^3 e posteriormente a região próxima do ponto de liberação foi refinada (formando uma micro malha); a largura e a altura das células da malha nesta região foram fixadas em 0,04 m em função da área do jato esperado após a expansão à pressão ambiente. De forma a tornar a transição entre as duas áreas gradual, as células da malha próximas ao ponto de liberação foram suavemente aumentadas até a resolução malha principal (cuboides de 1 m^3), mantendo-se a alteração máxima de uma célula para a próxima menor do que 40% (como recomendado no manual do FLACS).

4. RESULTADOS OBTIDOS

Um dos objetivos da pesquisa em andamento é oferecer novos conjuntos de dados de dispersão de nuvem para a comunidade internacional a ser usado para estudos de validação de modelos e fornecer novas percepções de fenômenos de dispersão de gás em ambientes complexos. Os dados mais relevantes adquiridos durante a prova P25_3 são apresentados nesta seção. Outro objetivo deste estudo é investigar, o desempenho de ferramentas CFD quando utilizadas para análises de dispersão de nuvem em cenários complexos; sendo assim, nesta seção são apresentados resultados preliminares deste estudo comparativo.

4.1 Resultados da prova P25_3

O desempenho da ferramenta CFD foi inicialmente avaliado utilizando-se o critério do fator de dois (FAC2), que analisa se os valores simulados se encontram dentro de uma faixa de \pm um fator de dois dos dados experimentais. Este fator é amplamente utilizado para fins de validação de modelos CFD. Ele foi um dos parâmetros recomendados por Weil et al. [22] e Hanna et al. [17] para avaliar os modelos de qualidade do ar e, mais recentemente, foi usado por Coldrick et al. [23] e Ivings et al.[24].

A Figura 2 apresenta a comparação entre os valores simulados e os dados experimentais referentes aos os valores máximos de concentração encontrados para os pontos nos quais os sensores de concentração foram posicionados. 72% dos pontos simulados atendem ao critério FAC2; considerando apenas a linha central de sensores, tem-se que 83% dos pontos atendem ao critério.

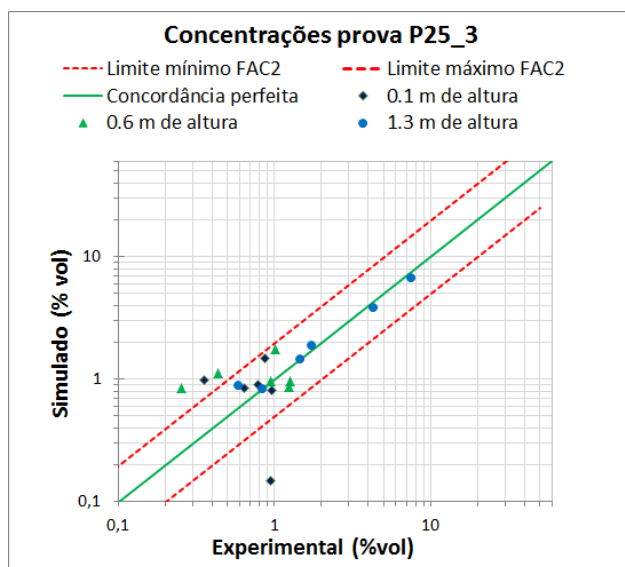


Figura 2 - Comparação entre valores simulados e dados experimentais da prova P25_3.

As Figura 3 e 4 mostram dois exemplos da evolução da concentração no tempo para dois sensores de concentração localizados na linha central: sensor 6C a 9,0 m do ponto de liberação, a 1,3 m de altura e sensor de 16B a 15 m do ponto de liberação e a 0,6 m de altura (5 m após a barreira). No que se refere ao sensor 6C, pode-se observar que ambas as curvas de concentração, experimental e simulada, apresentam boa concordância. Nota-se que a nuvem simulada parece diluir mais rápido do que a real. Também é possível observar como a curva simulada é mais suave do que o real. Uma das razões para que este evento ocorra está associado ao perfil de vento simulado; velocidade e direção de vento constante são consideradas durante as simulações, no entanto, durante a prova foram registradas oscilações, a velocidade do vento variou entre $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e a direção entre 63° e 287° . Com uma dinâmica do vento simulada mais simples que a real, o modelo representa a turbulência de maneira mais constante do que o ocorre no campo experimental. Sendo assim, a nuvem simulada dispersa mais suavemente do que a nuvem experimental. No entanto, a fim de verificar essa hipótese dados experimentais mais abrangentes são necessários.

No que se refere ao sensor 16B, os valores de concentração também apresentam boa concordância com os dados experimentais nos instantes iniciais. Porém neste caso, a nuvem simulada apresenta um pico de concentração máxima maior do que o registrado pelo sensor. A nuvem simulada também dilui mais rapidamente. A simulação falha em representar a complexidade da acumulação dinâmica detectada pelo sensor, que ocorrem a partir de 30 segundos depois da liberação. Opostamente, a concentração simulada torna-se insignificante durante este período particular.

Os dados referentes à evolução da concentração no tempo referentes aos demais sensores utilizados nesta prova, são apresentados por Schleder et.al. [25].

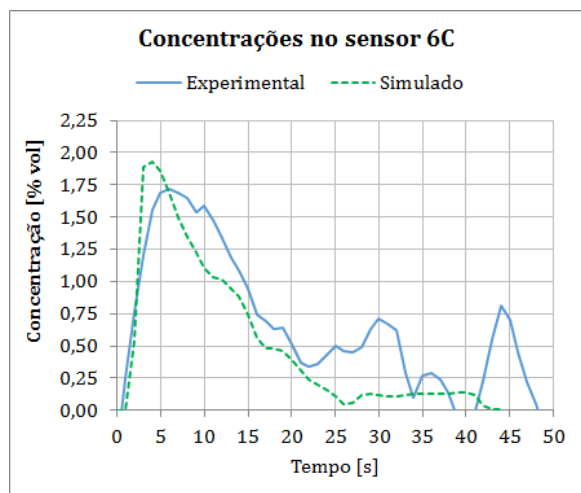


Figura 3 - Concentrações simuladas e experimentais para o sensor 6C durante a prova P25_3.

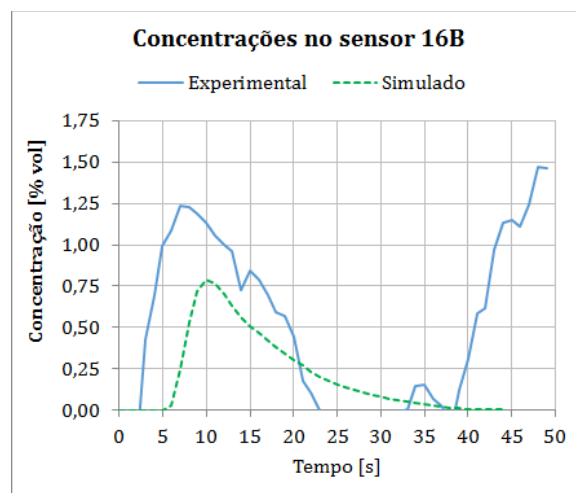


Figura 4 - Concentrações simuladas e experimentais para o sensor 16B durante a prova P25_3.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a primeira fase da campanha experimental realizada pelo projeto em conjunto entre a Universidade de São Paulo e Universidade Politécnica da Catalunha planejado para fornecer novos dados experimentais sobre dispersão de gás, cujo objetivo é investigar o desempenho de ferramentas CFD para análise de dispersão de substâncias inflamáveis e/ou tóxicas em ambientes complexos.

Dados sobre a concentração de nuvens tóxicas e/ou inflamáveis como função do tempo e espaço são muito escassos; usualmente, os dados experimentais são apresentados em gráficos de concentrações em instantes e posições específicos e, majoritariamente, apenas os valores máximos são fornecidos. Os dados experimentais obtidos durante a fase experimental aqui apresentada são muito mais abrangentes do que qualquer outro conjunto de dados experimentais publicados referentes à dispersão da nuvem, o que será particularmente adequado para a comunidade científica para realizar estudos completos de validação de modelos.

Os testes realizados pela USP-UPC consistiram em liberações contínuas de GLP na atmosfera e subsequente monitoramento e caracterização das nuvens formadas em função da concentração. Alguns dos ensaios realizados foram planejados para investigar a influência de uma obstrução posicionada no percurso do fluxo de vapor. Neste artigo foram apresentados os testes de campo executados e análises preliminares comparando os dados de concentração de GLP de uma das provas com simulações CFD. Em termos gerais, o simulador tem mostrado bom desempenho em relação às concentrações da nuvem. O simulador apresentou bom desempenho quando analisado pelo critério FAC2, que é um indicador bem estabelecido e padronizado para fins de validação de modelos de dispersão.

O FLACS apresentou uma diferença média de 18% em relação aos dados experimentais para a prova apresentada neste artigo, o que é aceitável dada a dinâmica geral dos testes experimentais (ou seja, taxa de liberação instável e flutuações na velocidade e direção do vento). O desempenho pode ser melhorado através da criação do cenário considerando dinâmica de vento mais complexa, como as encontradas durante os testes de campo, à custa, no entanto, de tempo de simulação. Um perfil de vento variável não é comumente encontrado em simulações CFD para análise da dispersão, no entanto cenários

reais estão longe de apresentar perfis de vento estáveis. Este é certamente um ponto relevante que deve ser explorado em trabalhos futuros.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) para a realização dos ensaios, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), através do Programa Ciência sem Fronteiras, e do Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH19) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e biocombustíveis (ANP) e da Petrobras, através do seu programa de bolsas.

7. REFERÊNCIAS

- [1] PLASMANS, J.; DONNAT L.; DE CARVALHO E.; DEBELLE, T. Challenges with the use of CFD for major accident dispersion modeling. *Process Safety Progress*, 32, n. 2, 2013. 207-211.
- [2] SKLAVOUNOS, S.; RIGAS, F. Simulation of Coyote series trials—Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions. *Chemical Engineering Science*, 61, 2006. 1434-1443.
- [3] CORMIER, B. R. et al. Application of computational fluid dynamics for LNG vapor dispersion modeling: A study of key parameters. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009. 332-352. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423008001629>>.
- [4] TAUSEEF, S. M.; RASHTCHIAN, D.; ABBASI, S. A. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 2011. 371-376.
- [5] BLACKMORE, D. R.; EYRE, J. A.; SUMMERS, G. G. Dispersion and combustion behaviour of gas clouds resulting from large spillages of LNG and LPG on to the sea. *The institute of marine engineers*, London - UK, 94, n. 29, 10 May 1982. 1-18. ISSN 0309-3948.
- [6] KOOPMAN, R. P. et al. Analysis of Burro series 40m³ LNG spills experiments. *Journal of Hazard Materials*, 6, 1982. 43-88.
- [7] GOLDWIRE, H. C. et al. Coyote Series Data Report, LLNL/NWC - LNG Spill Tests Dispersion, Vapor burn and rapid-phase transition. Livermore, California. 1983.
- [8] HANLIN, A. L. A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, A132, 2006. 119-140.
- [9] MIDDHA, P.; HANSEN, R. Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 2009. 295-302.
- [10] BILTOFT, C. A. Customer Report for Mock Urban Setting Test (MUST). DPG Doc. No. WDTC-FR-01-121. West Desert Test Center, U.S. Army Dugway Proving Ground, Dugway, UT 84022-5000. 2001.
- [11] ALLWINE, K. J.; FLAHERTY, J. E. Urban Dispersion Program Overview - PNNL-16696. Pacific Northwest National Laboratory. Richland, US, p. 1-63. 2007.
- [12] BROWN, T. C. et al. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field. [S.l.]. 1990. Available at: <http://www.osti.gov/energycitations/purl.cover.jsp?purl=/6633087-9HP88a/Falconseriesdatareport:1987LNGvaporbarrierverificationfieldtrials.pdf> accessed on March, 2013.
- [13] ERMAK, D. L. et al. A comparison of dense gas dispersion model simulations with Burro series LNG spill test results. *Middha & Hansen*, 2009, 6, 1982. 129-160.

- [14] GAVELLI, F.; BULLISTER, E.; KYTOMA, H. Application of CFD (Fluent) to LNG spills into geometrically complex environments. *Journal of Hazardous Materials* 159, 2008. 158-168.
- [15] HANSEN, O. R. et al. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010. 857-877.
- [16] BUTLER, C. J.; ROYLE, M. Experimental data acquisition for validation of a new vapour cloud fire (VCF) modelling approach. 1-102, p. 1-102. 2001. www.hsl.gov.uk.
- [17] HANNA, S. et al. The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, n. 212, 2012. 406-412. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jhazmat>. Acesso em: Setembro 2013.
- [18] GEXCON AS. FLACS Software: Version 10.3. [S.l.]. 2013.
- [19] LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. [S.l.]: [s.n.]. 1974. p. 269-289.
- [20] HSE-HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. Fire and Explosion Strategy - Issue 1. Hazardous Installations directorate - Offshore division. [S.l.], p. 1-64. 2013.
- [21] GEXCON AS. FLACS v10.0 User's Manual. Norway, p. 1-374. 2013.
- [22] WEIL, J. C.; SYKES, R. I.; VENKATRAM, A. Evaluating Air-Quality Models: Review and Outlook. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 1992. 1121-1145.
- [23] COLDRICK, S.; LEA, C. J.; IVINGS, M. J. Validation database for evaluating vapor dispersion model for safety analysis of LNG facilities - Review. The fire protection research foundation. [S.l.]. 2009. Available in http://www.nfpa.org/assets/files/pdf/research/lng_database_guide.pdf at March, 2013.
- [24] IVINGS, M. J. et al. A protocol for the evaluation of LNG vapour dispersion models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, n. 26, 2013. 153-163. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jlp>. Acesso em: January 2014.
- [25] SCHLEDER, A. M.; FERRER, E. P.; CUCHI, E. P.; MARTINS, M. R.; Experimental data and CFD performance for cloud dispersion analysis: the USP-UPC project. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015. Aceito para publicação em 08/09/2015 Ref. No.: JLP-D-15-00237R1.