

## **Projeto Multi-Cliente Buncefield Fase 2 Análise da Fenomenologia do Acidente**

Bassam Burgan<sup>1</sup>  
Renato F. Mendes<sup>2</sup>

### **Sumário**

O acidente de Buncefield, em dezembro de 2005, foi devido ao vazamento de gasolina em tanque seguido por explosão de nuvem de vapor que causou elevados danos a terceiros e perda de contenção dos demais tanques de armazenamento do terminal. Além da perda de integridade dos tanques próximos com incêndio dos inventários vazados que durou cinco dias para extinção. Em maio de 2006, a Comissão Investigadora de Acidentes do Governo Inglês convocou especialistas em explosão para desenvolver estudo para explicar a gravidade da explosão de Buncefield. Adicionalmente, dois projetos multi-clientes Fase 1 e Fase 2 realizaram mais investigações e experimentos para entender a formação de nuvem de vapor, dispersão e explosão de grande massa de vapor, em conjunto com a influência de vegetação densa durante o desenvolvimento da explosão.

O extravasamento do tanque de gasolina por 20 minutos resultou numa nuvem com diâmetro superior a 200m. E nesta Fase 2, testes em escala real de formação de nuvem de vapor de gasolina devido ao efeito cascata do sobre enchimento foram realizados.

O método VCA para estimativa da nuvem de vapor foi validado e provê suporte científica para dimensionamento de nuvem de vapor com base na taxa de descarga e duração do efeito cascata. Sendo possível ser utilizada para determinar se a nuvem vai atingir áreas vulneráveis tais como: casa de controle ou habitações extramuros, antes da ocorrência ser detectada pela instrumentação.

Neste artigo, discutimos o acidente, e os desenvolvimentos da Fase 2 para compreensão da formação da nuvem e análise do mecanismo que levou à explosão da massa de vapor de gasolina.

### **O PROJETO MULTI-CLIENTE BUNCEFIELD FASE 2**

De forma similar ao acidente de Buncefield, em outubro de 2009, dois incidentes semelhantes ocorreram, um em Porto Rico e outro em Jaipur, na Índia. Uma característica comum destes acidentes é extensa nuvem de vapor ( $>100$  mil m<sup>2</sup>) e de baixa altura (2-3 m) que ignitando resulta em grave explosão, causando danos por sobrepressão que se estende por alguns quilômetros.

Em 2006, Major Incident Investigation Board (MIIB) do Reino Unido, responsável pela investigação do Governo Inglês, convocou especialistas em explosão para desenvolver estudo para explicar a gravidade da explosão de Buncefield. Este Grupo Consultivo realizou avaliação preliminar das provas forenses e dos resultados dos exames complementares realizados pelo Health & Safety Laboratory (HSL), mas não houve tempo disponível para identificar as razões que explicassem todos os aspectos da explosão em Buncefield. Por isso, recomendou-se um projeto multi-cliente com objetivo de complementar a avaliação iniciada pelo Grupo Consultivo do Governo, e definir requisitos para novas pesquisas.

Em Maio 2008 a Maio 2009, o projeto multi-cliente (Buncefield-Fase1) examinou em detalhes as evidências forenses, seguidas por testes e análises adicionais. Foi concluído que o cenário mais provável foi devido à ignição da nuvem de gasolina no interior da casa de bombas de incêndio do terminal, gerando uma deflagração que transacionou para detonação enquanto a chama percorria a densa vegetação no perímetro do terminal (cerca viva). Ainda na Fase1, o projeto recomendou que fossem realizados experimentos adicionais para: melhor compreensão das características de dispersão e explosão de grandes nuvens de vapor, a influência de uma densa vegetação no desenvolvimento da explosão, e se mecanismo alternativo para a detonação poderiam ter participado no processo da explosão.

Este novo projeto multi-cliente, nomeado Buncefield-Fase2, tem início em julho de 2010 e foi concluído em dezembro 2013, sendo o projeto patrocinado pela: BP (UK), Health and Safety Executive (UK), Petrobras (BR), Shell (NL), Statoil (NO), Total (FR), Le Ministère de L'écologie, du Développement Durable et des Transports (FR), e RIVM (National Institute for Public Health and The Environment (NL), e coordenado pelo Steel Construction Institute (UK) com tradição na condução de pesquisas em fogo e explosão. Foram envolvidos diversos programas de testes e estudos para entender como: as nuvens de vapor se desenvolvem após perda da contenção primária, a características de explosões envolvendo grande nuvem de vapor inflamável plana e os principais mecanismos de explosão que podem dar origem a elevadas sobrepressões sobre uma área grande como observado em Buncefield e outros acidentes similares.

## **PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUAS IMPLICAÇÕES PRÁTICAS**

### **Formação de Nuvem Inflamável**

1. O acidente de transbordo de gasolina de tanque de armazenamento, na condição de ausência de vento, pode levar ao desenvolvimento de uma grande nuvem de vapor na superfície (nuvem panqueca). Para um tanque de gasolina, como de Buncefield o raio da pluma de vapor alcançou 100m após 5 minutos e cerca de 200 m após 20 minutos. Uma explosão envolvendo tal nuvem de vapor achatada (panqueca) pode resultar numa explosão severa gerando altas sobrepressões.
2. O método VCA de avaliação da nuvem de vapor foi validado e estendido a outros produtos para fornecer uma base científica de cálculo do tamanho de nuvem em função da taxa de descarga e duração da perda de contenção. Por exemplo, o método pode ser utilizado para determinar se uma nuvem vai atingir um alvo vulnerável (por exemplo, uma sala de controle), antes de o vazamento ser detectado e se medidas mitigadoras adicionais serão adotadas. Se a tancagem estiver em declive significativo maiores análises (por exemplo, CFD) pode ser necessária para determinar o verdadeiro nível de risco.
3. O método VCA está descrito no artigo HSL que pode ser obtido no endereço:  
<http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr908.pdf>

### **Efeito da Vegetação na Sobrepressão da Explosão**

1. Nos testes de explosão realizados, houve aceleração da frente de chama através da vegetação (10-20m) e dependendo das características da vegetação a velocidade da chama foi constante ou ocorreu a Transição da Deflagração para a Detonação DDT.
2. Dois ensaios onde foram utilizadas 4,5m de largura para a linha de vegetação (cerca viva) resultou em detonações.
3. Um teste com 2m de largura para a linha de vegetação muito densa produziu velocidade de chama de 150 m/s e sem ocorrer Transição da Deflagração para a Detonação.
4. As condições que podem gerar transição para detonação não puderam ser determinadas devido ao número limitado de testes realizados e a alta variabilidade da vegetação. A presença de folhagens e galhos pequenos na vegetação sempre resultou em aumento da velocidade da chama.
5. A vegetação utilizada nos testes foi resultante do corte de árvores e montagem em gabaritos para formar uma vegetação em linha (cerca viva). A distribuição dos ramos nas cercas vivas naturais irá divergir daquelas construídas nos experimentos. Não foi possível dentro do escopo do projeto quantificar estas diferenças.

## **Características da Detonação de Grandes Nuvens de Vapor Inflamável**

1. Explosões de grandes nuvens de vapor não confinadas (tipo panqueca) pode gerar elevadas sobrepressões. A detonação pode propagar através de relativamente finas ( $<200\text{mm}$ ) camadas detonáveis e caminhos em uma grande nuvem de vapor de propano/ar.
2. Pequenas variações de concentração estequiométrica e a localização do ponto de ignição tem pouco efeito na sobrepressão fora da nuvem inflamável.
3. A sobrepressão fora da nuvem diminui rapidamente com o afastamento em relação à borda da nuvem inflamável.
4. Um simples algoritmo foi desenvolvido e validado para cálculo da máxima sobrepressão externa, sendo aplicável para as nuvens com um raio  $\geq 50\text{m}$ . Para nuvens menores, o Método Multi-Energia ou TNT Equivalente podem ser usados. Esta abordagem é robusta dentro dos limites dos testes realizados.
5. Sobrepressões acima de 3 bar foram encontradas causando danos significativos em carros e caixas de elétrica. Apenas pequenos danos ocorrem quando a sobrepressão for  $\leq 1\text{ bar}$ . Os tambores de óleo indicaram que sofrem danos quando em sobrepressão  $> 2\text{ bar}$  e danos são identificados a sobrepressão de 3 bar.
6. Um container ISO de 6 metros teve danos reduzidos às suas paredes quando submetidas à detonação com sobrepressão de 420mbar. Porém, paredes e teto do container sofreram danos significativos quando expostos a sobrepressão de 2 bar, bem como foi deslocado por cerca de 3 m devido à explosão.
7. A energia de impulso em objetos dentro da nuvem de vapor atua na direção oposta à direção de propagação de uma detonação. Objetos próximos à nuvem inflamável, o impulso atua no sentido da propagação da detonação, e o fluxo reverso terá curto duração.

## **Resposta estrutural de objetos simples**

1. Simples equipamentos, tais como: caixas de elétrica, tambores, containers, marcos, postes, entre outros localizados no local do acidente fornecem indicações da magnitude das sobrepressões e direção de propagação da explosão.
2. As caixas de elétrica utilizadas nos experimentos foram analisadas e gráficos foram desenvolvidos para estimativa da caracterização da explosão por meio da inspeção dos danos alcançados em tais caixas.

## RESUMO DOS EXPERIMENTOS E ESTUDOS REALIZADOS

### Formação de nuvens Inflamável

Sete ensaios em escala real de extravasamento foram realizados pelo HSL, Buxton (UK), utilizando um pseudo-tanque de 10,4 m de altura, ver fig.1. Em quatro destes ensaios, hexano foi usado para análise da dispersão de vapores. A região impactada pela cascata formada foi cercada por pseudo-diques (vertical e inclinado). As correntes de vapor, advindas da cascata, são defletidas para cima pelo dique levando à recirculação e acúmulo de vapor dentro do dique, que posteriormente é projetado para fora com incorporação de ar adicional. Três ensaios adicionais (sem dique) analisaram o processo de transferência de calor e massa na cascata formada e a fase inicial da corrente de vapor formada devido à cascata. Foram feitas diversas medições tais como: temperatura da corrente de vapor fora da cascata, temperatura do fluido na cascata, temperatura do fluido em toda a área de impacto na superfície, concentração de vapor e umidade relativa. Todos os ensaios foram gravados usando vídeo convencional e infra-vermelho.



**Fig.1** – Realização do Teste 1 e simulação do dique, no HSL

Verificou-se que as condições dentro da região impactada pela cascata se aproximam do equilíbrio. Um método simples (baseado na conservação do momento e equilíbrio termodinâmico) pode prever o volume de ar aspirado pela cascata e as estimativas da concentração de vapor são aderentes com os ensaios. Uma pequena quantidade de líquido é projetada fora da zona de respingo como um fino spray. Ar adicional é arrastado pela corrente de vapor, o spray fornece uma pequena quantidade extra de vapor que totaliza de 10-20% da taxa de vaporização total.

Comparações dos parâmetros monitorados nos ensaios e estimativas realizadas em modelos de CFD da cascada, da acumulação da corrente de vapor e da descarga de vapor pelo dique apresentaram aderências aceitáveis. Um modelo simplificado, Vapor Cloud Analysis-VCA, desenvolvido pelo HSL, para o cálculo da taxa de geração de vapor para acidente de derrame na tancagem foi validado sendo encontrados resultados confiáveis. Para permitir a aplicação mais ampla deste método, uma análise termodinâmica foi realizada para grupo de solventes e misturas petroquímicas que são comumente encontrados na indústria química e petroquímica e os parâmetros necessários para estender o método para estas substâncias foram desenvolvidos.

### **Efeito de objetos com múltiplos diâmetros na caracterização da explosão**

Sete ensaios foram realizados pela Gexcon, em Bergen (NO), num módulo de 9m<sup>3</sup> (1,21 x 1,22 x 6,1m) preparado para testes de explosão com uma extremidade aberta. A mistura ar-propano com uma concentração de 4,2-4,3% v/v, foi utilizada nestes ensaios. O congestionamento foi alcançado por quatro filas de tubos com diâmetros 4, 20 e 104 mm, ver fig.2. Formam monitoradas as sobrepressões geradas dentro e fora do módulo sendo registrados os ensaios em vídeo de alta velocidade para identificar a aceleração e velocidade de chama. Os tubos (obstáculos) foram de único diâmetro e em diferentes configurações para avaliar se pequenos obstáculos (tubos) são menos eficazes em gerar sobrepressão de explosão que obstáculos de maior diâmetro (tubos), e na medida em que combinações de diferentes diâmetros de tubos têm o potencial de gerar maior sobrepressão que distribuição uniforme de obstáculos.



**Fig.2** - Dispositivo de teste com tubos de diferentes diâmetros, para verificar a contribuição de cada dimensão para a turbulência



As velocidades de chama foram semelhantes para todos os ensaios que utilizam tubos de similar diâmetro. No ensaio combinando tubos de 4 e 20 mm houve 11% de aumento da sobrepressão, sendo este um menor aumento considerando a faixa do erro experimental, em tais ensaios. No entanto, em todos demais ensaios, ocorreu aumento da sobrepressão de pico ligeiramente maior, com o aumento de 15% a 16% da sobrepressão nos ensaios que usam dois diâmetros de tubos e aumento de 21% no ensaio com presença de três diâmetros de dutos. Dado que o “blockage volume” é semelhante nestes ensaios, e as velocidades de chama também são maiores nestes ensaios, o aumento da propagação da explosão será provavelmente causado pela mistura dos diferentes diâmetros de tubos.

Os ensaios neste módulo fornecem dados confiáveis que podem ser utilizados no desenvolvimento e validação da modelagem em CFD, particularmente para a construção das malhas e sub-malhas de obstáculos.

### **Ensaio de média escala para investigação da influência da vegetação na propagação de chama em espaços semi-confinados**

Dezesseis ensaios de explosão foram realizados pela Gexcon, em Bergen (NO), num módulo de 50 m<sup>3</sup> com dimensões de 8,0 x 2,5 x 2,5 m, ventilado apenas numa extremidade e com ignitor localizado na extremidade oposta. Foram utilizadas três espécies de árvores comuns em “cercas vivas” para gerar congestionamento - três testes foram com abetos (pinheiro de natal), sete com bétulas ou vidoeiros, dois com tubos e dois com pinheiros Thuja (pinheiro de cemitério), ver fig.3.



a) Pinheiros Abeto



b) bétulas ou vidoeiros  
(comum no Brasil)



c) Pinheiros Thuja

**Fig.3** – Espécies de árvores consideradas para cercas vivas

As árvores foram caracterizadas por amostragem (medidas), a fim de determinar as características do congestionamento. Dois testes foram realizados com container vazio como ensaios de referência, ver fig.4.

Árvores ou tubos foram instalados em 11 ou 4 posições dentro do módulo, dependendo se um nível alto ou médio de congestionamento exigido no teste. Em alguns testes, as bétulas foram aparadas para remover as folhas e ramos de determinados diâmetros. Este ajuste do congestionamento foi realizado sistematicamente em três estágios para análise do efeito dos elementos de menor diâmetro das árvores. Todos os ensaios, exceto com abetos, foram realizados mistura homogênea de propano/ar a 4,2% v/v. Foram medidas as sobrepressões internas e externas ao módulo durante os ensaios e utilizado vídeo de alta velocidade para análise da evolução da chama e velocidade da frente de chama.



**Fig.4** – Container de teste de explosão, vista da face de ventilação.

Ensaio utilizando 4 abetos ou 4 bétulas e mistura de gás/ar de 4,2% v/v geraram sobrepressões semelhantes; estas foram 5-9 vezes mais elevadas (1500-2500 mbar) que ensaio de referência vazio (200-300 mbar). A remoção da folhagem das bétulas causou redução significativa das sobrepressões de pico. A maior queda da sobrepressão ocorreu quando os menores galhos < 2-3 mm (e folhas) foram removidos. A redução da sobrepressão por um fator de 2-3 (500-600 mbar) foi atingido comparado às árvores não aparadas. Além disso, o corte de galhos com diâmetro < 8 mm produziram sobrepressões no intervalo de 400-600 mbar. A remoção de todos os



galhos deixando apenas os troncos produziu sobrepressões aproximadamente 30-40% mais elevada (fator 1,3-1,4) do que a ensaios de referência.

Não foi observada diferença na sobrepressão quando aplicado tubos ao invés de troncos de árvores com diâmetros e quantidades semelhantes. Para dado layout de congestionamento, não foi encontrada diferença de sobrepressão entre árvores das espécies abetos e bétulas, apesar do menor “blockage volume” das bétulas comparadas às abetos. Quando no módulo, o congestionamento de árvores foi alterado para única fileira de pinheiros Thuja que corresponde a um alinhamento de pinheiros com 0,5 m de largura e 1,5 m de altura ao longo do centro do dispositivo de ensaio, as sobrepressões de pico foram 2-3 vezes mais elevada do que o ensaio de referência (container sem congestionamento). Aumentar a largura do congestionamento para 1,0 m por usando uma dupla fileira de pinheiros Thuja, aumentou a sobrepressão de pico por um fator de 5-12 vezes em comparação com ensaio de referência. Isto indicou que a largura das cercas vivas e folhagem tem significativo efeito sobre as características de explosão.

O parâmetro físico “blockage volume” responsável pela aceleração da frente de chama durante ensaios de tubos em laboratórios, para os ensaios com “cercas vivas” foi visto que é requerido valor menor para acelerações similares. A razão para isso pode ser a contribuição dos pequenos obstáculos representados por folhas, pequenos ramos e galhos utilizadas nos ensaios.

Os ensaios geraram um banco de dados para as previsões de explosão utilizando modelagem por CFD para o estudo de congestionamento causado pela vegetação em explosões de gás.

### **Testes em escala real para investigação da influência da vegetação na explosões de nuvens**

Oito ensaios de explosão foram realizados pela DNV GL, em Spadeadam (UK), para representação de “cercas vivas”, ou seja, alinhamento de arvores em fileiras de até 100m de extensão e até 4,5m de largura, para simulação do congestionamento, ver fig.5. Em todos os testes, uma mistura de propano/ar estequiométrico foi aplicada e o ponto de ignição foi localizado no interior da linha de árvores, a 1m da extremidade e pouco acima do nível do solo. A densidade e a largura da “cerca viva” foram as principais variáveis estudadas nestes ensaios. No entanto, a natureza de vegetação é de tal ordem que a variabilidade não intencional está sempre presente nos ensaios, devido não existir duas árvores idênticas.

As árvores utilizadas nos ensaios foram caracterizadas por amostragem, cortando e medindo-se os diâmetros e os comprimentos dos componentes de cada árvore amostrada. Durante os ensaios, o congestionamento foi sendo variado usando um número de árvores/m<sup>2</sup> no dispositivo de ensaio. No primeiro teste, foram utilizados arvores abetos.



**Fig.5** – Dispositivo após teste, sem o filme de polietileno para conter nuvem de vapor

A espécie Alder (Amieiros) foi utilizada nos seis ensaios subsequentes e uma combinação de amieiros e bétulas foram usadas no último ensaio. A largura do layout do ensaio variou de 1 m até 4,5 m. Foram monitoradas as sobrepressões (dentro e fora da fileira de árvores) e velocidade da chama ao longo das árvores. Todos os testes foram gravados em vídeo convencional e alta velocidade.

Uma transição de deflagração para detonação DDT ocorreu em duas das oito ensaios, sendo a densidade de 1,5 e 3 árvores/m<sup>2</sup> e ambos os ensaios tinham 4,5 m de largura em árvores. No ensaio com 1,5 árvores/m<sup>2</sup>, as árvores foram arranjados em um padrão de tabuleiro de damas (áreas repetidas de 1 e 2 árvores/m<sup>2</sup> para dar média de 1,5 árvores/m<sup>2</sup>). Este fato que pode ter contribuído para a aceleração da chama. Nestes dois ensaios, o DDT foi identificado nos primeiros 15-20 m de propagação da chama. Nas seis ensaios restantes (com larguras de 1-4,5 e densidade de 1,5-6,5 árvores/m<sup>2</sup>), a velocidade máxima de chama variou de 60-200 m/s e foram alcançadas nos primeiros 15 m.

Dos ensaios, houve evidência consistente que a presença de folhagem contribui para velocidades mais elevadas de chama. Por exemplo, os abetos, que teve uma grande quantidade de folhagem em forma de agulhas, produz relativa alta velocidade de chama (140 m/s), mas tem o menor “blockage volume” de todos os ensaios (entre 0,09 e 0,2). Isso ficou evidente em outros testes onde as folhas eram queimadas num primeiro ensaio (sem danos para as árvores) e as mesmas árvores foram reutilizadas nos testes subsequentes.

O teste de maior densidade de árvores com 6,5 árvores/m<sup>2</sup> tinha uma largura de 2m, sendo produzida uma velocidade chama de 150 m/s e sem ocorrer detonação. Portanto, sem correlação

da densidade de árvores com a elevação da velocidade de chama, mas havendo interferência com a presença ou não de folhagem. É provável que a caracterização da aceleração de chama esteja correlacionada à região congestionada e à variabilidade na natureza da vegetação.

A Gexcon, por meio da caracterização das árvores aplicadas aos ensaios e utilizando o programa Flacs dimensionou todos os ensaios da DNV GL buscando atingir a detonação, mas os ensaios de campo não reproduziram o desejado.

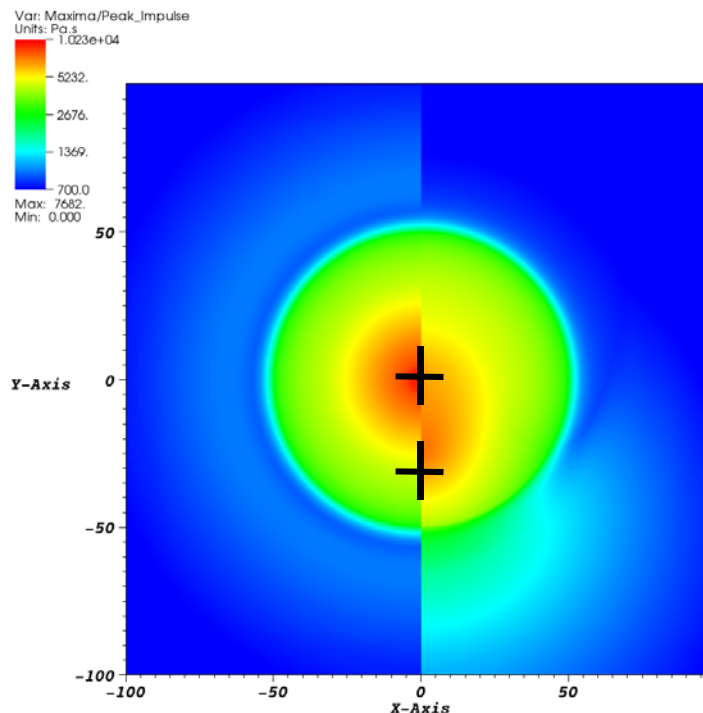
### **Estudo das características da detonação de grandes nuvens de vapor**

Uma diversidade de geometrias de nuvens de propano/ar e locais de ignição foram estudadas numericamente pela consultora Fluid Gravity (UK) para proporcionar um melhor entendimento da sobrepressão/impulso e velocidade de chama radial dentro e fora da nuvem inflamável circular e baixa (nuvem panqueca), sendo ignitada em diferentes pontos na nuvem.

Geometrias estudadas incluíram a ignição no centro de nuvem com raio de 200m e altura de 1 a 3m, e outra nuvem com altura no centro de nuvem de 3m e 1m de altura na borda da nuvem. Outras geometrias de nuvem inflamável incluem raio de 100 m e altura de 1 m, e outra com raio de 50 m e altura de 2 m, considerando ignição no centro da nuvem. Na modelagem, foi verificado que sobrepressão e impulso decaem rapidamente com distância da borda da nuvem, assim como decai rapidamente com altura acima da nuvem. No campo próximo, nuvem com grande raio mantem sobrepressões mais elevadas com o afastamento do seu centro. No campo distante, a energia total libertada pela detonação (que é uma função do volume de nuvem) torna-se o fator dominante e sobrepressões de pico independentemente da geometria da nuvem, neste caso a geometria exata da nuvem torna menos importante.

Misturas inflamáveis pobres (3,2%) produzem sobrepressões 10% inferiores a uma distância de 100 m da borda de nuvem com 200m de raio e 3m de altura. Misturas ricas (5,5 e 6,8%) produzem sobrepressões semelhantes às nuvens estequiométricas, mas maior impulso devido à adicional queima da mistura rica.

Ignição não centrada possui pouco efeito na sobrepressão de pico fora da nuvem, mas resulta em aumento significativo do impulso no lado da nuvem próximo do ponto de ignição, ver fig.6. Foi calculada a sobrepressão refletida por objetos localizados dentro e fora da nuvem inflamável. Estes deram uma indicação de como ambos objetos refletem a sobrepressão e impulso de acordo com a distância a partir da nuvem.



**Fig.6** - Análise de explosão com ignição não concêntrica e repercussões no campo próximo e distante

## Testes em escala real para investigação das características da detonação de nuvens de vapor inflamáveis

Seis experimentos (todos com geometria retangular) utilizando misturas estequiométricas de propano/ar foram realizados pela DNV GL, em Spadeadam (UK). A detonação da nuvem foi garantida por pequena carga explosiva. O primeiro ensaio demonstrou o efeito de uma explosão de vapor em nuvem com objetos (carros, caixas, tambores) dentro desta e forneceu informações sobre a redução da sobrepressão com a distância a partir da nuvem. Três ensaios adicionais considerados o fator de forma da nuvem de vapor no campo de sobrepressão gerado a partir da borda da nuvem e o efeito de objetos (carros, caixas, tambores) colocados fora da nuvem. Os dois últimos ensaios estudaram o efeito da espessura da camada de nuvem sobre o solo durante detonação, e a altura mínima de camada de nuvem necessária para sustentar uma detonação. Nestes testes, a altura da nuvem foi reduzida do valor inicial de 2 m numa extremidade até altura de 200 mm na outra extremidade. O conjunto de experimentos permitiu a geometria da nuvem para ser alterada da extensão máxima de 30 m, largura máxima de 10 m, e altura máxima de 4 m.

Foram monitoradas sobrepressão e velocidade da chama no interior da plataforma de teste e sobrepressão em diferentes direções fora da plataforma. Houveram registros em vídeo normal e alta velocidade.

No campo próximo, as sobrepressões fora da nuvem, no eixo transversal, demonstraram ser menor que sobrepressões encontradas no eixo longitudinal da explosão, mas essas diferenças desapareceram no campo distante. O Fator de aspecto da nuvem, não influi no decaimento da sobrepressão ao longo do eixo longitudinal da explosão, mas no eixo transversal a sobrepressão é maior quanto maior for o fator de aspecto.

No campo distante, as sobrepressões medidas foram subdimensionadas pelos métodos TNO Multi-Energia e TNT Equivalente por até 44%..

Os experimentos de detonação em nuvens inflamáveis com bordas de altura reduzida demonstraram que há continuidade na propagação da detonação até os 200 mm de altura, nas bordas. Como conclusão, a detonação será capaz de propagar através de camadas inflamáveis finas (200 mm) numa grande nuvem. Isto confirma que a detonação é menos suscetíveis a variações de concentrações que a deflagração. Uma vez que a detonação tenha sido iniciada, ela irá propagar pela restante da nuvem, ignorando todas as zonas onde as concentrações estejam fora da faixa detonante, ver fig.7.



**Fig.7** - Simulação de pluma com altura variável para análise da massa participante da detonação

Os testes demonstram que sobrepressão ao redor de 1 bar é requerido para danos significativos em veículos. Tambores de óleo colocados fora da nuvem de vapor indicam que vinco das superfícies do tambor se requer sobrepressão > 2 bar. Caixas de elétrica colocadas fora da nuvem de vapor indicam que as molas da porta e das laterais ocorrem por sobrepressão > 3 bar.



## Resposta estrutural de caixas de elétrica

O Steel Construction Institute SCI analisou as caixas de elétrica localizadas fora da nuvem inflamável nos testes de detonação, ver fig.8, quando foram aplicadas diferentes técnicas de elementos finitos. Análise acoplada Euleriana-Lagrangiana (para permitir a interação da sobrepressão incidente sobre a caixa e a resposta estrutural da superfície perante esta ação externa) foi verificada prever as deformações das caixas muito bem, particularmente onde a deformação foi severa (após a exposição à sobrepressão > 3 bar). Análise desacoplada Lagrangiana pura superestimou as deformações por não considerar a interação aplicação-resposta. Portanto, se tal análise é utilizada para estimar a sobrepressão a partir de observações de caixas deformadas, a sobrepressão é susceptível de ser subestimada.



Fig.8 – Típicas deformações em caixa de elétrica

Boa aderência foi identificada nas avaliações estruturais por análises acopladas perante as deformações medidas nas caixas. Para algumas caixas, que não localizadas perto dos transdutores de sobrepressão, uma sobrepressão foi estimada. Os valores de sobrepressão considerados na análise foram do limite superior do range de pressão, portanto as deformações calculadas na análise tendem a ser mais elevadas do que as medidas.

Diagramas de pressão/impulso foram construídos para as caixas de elétrica usando modelo validado de elementos finitos e representações visuais das formas deformadas sob uma variedade de cargas de detonação geradas. Estes podem ser utilizados para uma rápida avaliação de sobrepressões em investigação de incidentes.

## Testes em escala real para investigação da possibilidade de mecanismos de explosão alternativos em grandes nuvens inflamáveis

Três ensaios foram realizados pela DNV GL, em Spadeadam (UK), para demonstrar em escala realista a viabilidade ou não do mecanismo de deflagração episódica. Este mecanismo foi sugerido durante projeto multi-cliente Fase1 como possível alternativa para o DDT. A nuvem de vapor nesses ensaios foi 30 x 10 x 3m de altura. A explosão foi iniciada numa câmara de explosão para criar uma superfície de chama grande que iria promover a ignição das partículas à frente do chama. Partículas de carbono e folhagens foram espalhadas no chão do dispositivo de ensaio e em bandejas elevadas dentro do dispositivo de teste.



**Fig.5** - Dispositivo de Teste para Explosão Episódica

Dois ensaios foram realizados com misturas estequiométricas de propano/ar e outro ensaio foi desenvolvido com mistura rica. Foram monitoradas as sobrepressões, radiação e velocidade da chama no interior da nuvem de vapor. Os ensaios não demonstraram a possibilidade de um mecanismo de deflagração episódica.

## CONCLUSÕES:

O projeto Buncefield Fase 2 foi composto por diversos grupos de trabalho e os mais importantes destaques são sumarizados abaixo:

1. O estravamento com formação de cascata em tanque de armazenamento atmosférico pode levar ao desenvolvimento de grande nuvem de vapor. Para a tancagem de gasolina em Buncefield, o raio da nuvem inflamável alcançou 100m em 5 minutos e cerca de 200m em 20 min. Uma explosão não confinada envolvendo tamanha nuvem de vapor pode resultar em uma explosão com possibilidade de detonação;
2. Para prática avaliação da extensão do efeito cascata, é razoável considerar que o alcance do líquido vaporizado durante estravazamento será o alcançado quando o líquido em cascata atinge o equilíbrio com ar entrainado. Esta consideração permite uma confiável estimativa do grau de vaporização da combinação do efeito cascata e impacto no solo;
3. O método VCA fornece base científica para dimensionamento do tamanho da nuvem inflamável em função da taxa de descarga e tempo de duração do efeito cascata. Podendo ser utilizado para identificar alvos vulneráveis em um terminal ou na comunidade;
4. Quando uma nuvem de vapor não confinada, localizada em área com arbusto, é ignitada foi verificado que a presença de vegetação acelerar a chama. A velocidade da frente de chama depende da área e volume bloqueados, bem como da largura da região abrangida pela frente de chama;
5. Nos experimentos de explosão conduzidos, a velocidade da chama é caracterizada em curto distancia (10-20m), além deste limite a chama tende a permanecer constante ou vai da deflagração para detonação (DDT); A caracterização do limite deflagração – detonação não pode ser determinada devido ao limitado número de testes e variabilidade da vegetação. Porém, a detonação apenas ocorreu em 2 dos 4 testes realizados com fileiras de arbustos de 4,5 de largura, demais 4 testes com 2 e 3m de largura da vegetação geraram reduzida velocidade de chama (60-150m/s);
6. Explosões em grande nuvem de vapor mesmo que de reduzida altura (2-3m) podem gerar elevadas sobrepressão;
7. Nas nuvens que explodiram, foi observado que pequenas variações na concentração estequiométrica produziram pouco efeito na onda de sobrepressão no interior da nuvem e sobrepressão fora da nuvem. Foi observado que misturas ricas aumentam o impulso da onda de pressão devido a “pós queima”;
8. Foi observado, que a onda de pressão devido a detonação em pequenas nuvens inflamáveis (raio < 50m) o método de Multi-Energia e TNT Equivalente podem ser utilizados;
9. Foi observado, que a onda de pressão devido a detonação em grandes nuvens inflamáveis (raio > 50m) que não há aderências aos métodos tradicionais, o grupo desenvolveu uma expressão empírica para estimativa da máxima sobrepressão fora da nuvem;
10. O método acima (10) usado em conjunto com método VCA (3) pode ser utilizado para estimar sobrepressão numa determinada locação dado um valor de estravazamento de tanque.

## REFERÊNCIAS:

1. Chang J.I. and Cheng Chung L. A study of storage tank incident, Journal of loss prevention in the process industries, 2006, 19, pp 51 59.
2. The Times of India, 30 October 2009, <http://timesofindia.indiatimes.com/city/jaipur/12-killed-in-Jaipur-IOC-depot-fire-Army-called/articleshow/5178346.cms> (checked on 1 November 2013).
3. Johnson, D. M. Characteristics of the Vapour Cloud Explosion Incident at the IOC Terminal in Jaipur, 29th October 2009, DNV GL Report Number 11510, August 2011.
4. Explosion Mechanism Advisory Group Report, Buncefield Major Incident Investigation Board, Crown copyright, published 08/2007.
5. The Buncefield Explosion Mechanism, FABIG Technical Meeting, June 2009, [www.fabig.com](http://www.fabig.com).
6. Buncefield Explosion Mechanism Phase 1 (Volumes 1 and 2), Prepared by The Steel Construction Institute, Crown copyright, published 06/2009. ([www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr718.htm](http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr718.htm)).
7. Vapour Cloud Development in Over-filling Incidents, FABIG Technical Note 12, 2013, [www.fabig.com](http://www.fabig.com).
8. Safety and environmental standards for fuel storage sites, Process Safety Leadership Group, Health and Safety Executive, 2009, [www.hse.gov.uk/comah/buncefield/fuelstorage-sites.pdf](http://www.hse.gov.uk/comah/buncefield/fuelstorage-sites.pdf).
9. van Wingerden, M. and Wilkins, B. Experimental Investigation of the Effect of Flexible Obstructions on Flame Propagation in Vapour Cloud Explosions, Ref. No.: GexCon 08 F44110 RA 1, 31/10/2008.