

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PAULO FERNANDO SILVA SOUSA

**IMPACTOS CAUSADOS POR ONDAS DE CHOQUE DE
EXPLOSÕES QUÍMICAS**

RECIFE

2015

PAULO FERNANDO SILVA SOUSA

**IMPACTOS CAUSADOS POR ONDAS DE CHOQUE DE
EXPLOSÕES QUÍMICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Pernambuco como parte dos
requisitos necessários para a obtenção
do grau em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires

RECIFE

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S725i Sousa, Paulo Fernando Silva.
 Impactos causados por ondas de choque de explosões químicas /
 Paulo Fernando Silva Sousa. - Recife: O Autor, 2015.
 40 folhas, il.

 Orientador: Prof. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires, PhD.
 TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Departamento de Engenharia Civil, 2015.
 Inclui Referências.

 1. Engenharia Civil. 2. Explosões. 3. Impactos. 4. Efeitos. 5. Riscos. I.
 Pires, Tiago Ancelmo de Carvalho (Orientador). II. Título.

 624 CDD (22. ed.) UFPE/BCTG/2015-308



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): 1 – PAULO FERNANDO SILVA SOUSA

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: PROFESSOR TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES

Examinador 1: PROF. JOSÉ JÉFERSON DO RÊGO SILVA – DECIVIL/UFPE

Examinador 2: PROF. DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE – DEMEC/UFPE

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

IMPACTOS CAUSADOS POR ONDAS DE CHOQUE DE EXPLOSÕES QUÍMICAS

LOCAL:

DATA: 04/12/2015 HORÁRIO DE INICIO: 15:35 HORAS.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) argüido(s) oralmente pelos membros da banca, sendo considerado(s):

1)(X) aprovado(s), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito

() Sem revisões.

(X) Com revisões, a serem feitas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias.(o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

2) (...) reprovado(s).

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife,de.....de 20....

Orientador:.....

Examinador 1.....

Examinador 2.....

Candidato 1.....

Candidato 2

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a família e aos amigos, pelo apoio e incentivo de sempre. Agradeço também aos professores Tiago Ancelmo, José Jéferson e Dayse Duarte, pelos valerosos conselhos e observações na construção desse trabalho.

RESUMO

As explosões químicas (Explosão da nuvem de vapor) acidentais podem causar graves problemas nas grandes indústrias modernas, sobretudo as químicas e petroquímicas. Seu principal efeito, a onda de choque, pode trazer impactos diretos às pessoas e estruturas ao redor. O conhecimento desses impactos e de como quantificá-los é importante na avaliação e análise dos riscos.

Palavras-chave: EXPLOSÕES. IMPACTOS. EFEITOS. RISCOS.

ABSTRACT

The accidental chemical explosions (Vapor Cloud Explosions) can cause serious problems in the modern industries, especially in the chemicals and petrochemicals. Its main effect, the shock wave, can bring direct impacts on people and structures around. The knowledge about these impacts and how to quantify them is very important in risk assessment and analysis.

Keywords: EXPLOSIONS. IMPACTS. EFFECTS. RISKS.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1. Justificativa.....	8
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Escopo.....	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 Explosões químicas.....	11
2.2 Onda de choque.....	12
2.3 Impactos nas pessoas.....	14
2.4 Impactos nas estruturas.....	18
3 MÉTODOS.....	22
3.1 Obtenção dos parâmetros da onda de choque	22
3.2 O modelo de vulnerabilidade de Eisenberg	27
4 RESULTADOS.....	33
4.1 Breve contextualização.....	33
4.2 Resultados e comentários.....	35
5 CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS.....	44
ANEXO 1 – Rotinas de cálculo do mathcad, usadas para os casos 1 e 2.	
ANEXO 2 – Páginas com os dados de entradas e saídas, usadas para implementar os casos 1 e 2 no software ALOHA.	

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Na indústria moderna, muitas atividades possuem riscos potenciais associados, como, por exemplo, a ocorrência de incêndios e explosões. Esses eventos, que muitas vezes ainda são considerados como “raros”, podem trazer consequências muito sérias, tais como lesões ou até mesmo perda de vidas humanas, bem como danos sérios à infraestrutura circundante.

Nesse sentido, conhecer bem esses riscos potenciais causados por eventos dessa magnitude é essencial, sob diversos âmbitos. Primeiro, para que as indústrias e empresas responsáveis sejam capazes de avaliar bem a maior parte dos riscos associados às suas atividades, para, assim, conceber melhores e mais eficientes sistemas de gerenciamento dos riscos e de proteção. Além disso, o conhecimento a respeito dessas potencialidades pode ser fundamental para evitar ou pelo menos reduzir o efeito de grandes catástrofes e perdas de vidas humanas.

Dessa forma, pode-se estudar esses efeitos sob diversas óticas. Uma das formas mais efetivas talvez seja a da quantificação dos efeitos, ou seja, por meio de formulações matemáticas (empíricas ou não), tenta-se estimar os efeitos causados por algum evento nas construções e pessoas ao seu redor. No caso específico de incêndios e explosões, e mais especificamente ainda em se tratando das explosões, pode-se dizer que não há tanta literatura disponível, sobretudo em língua portuguesa.

Além disso, esse campo de estudo ainda está muito aberto, ou seja, a maior parte das formulações matemáticas atualmente utilizadas ainda é muito de caráter empírico. Desse modo, estudar essa metodologia de quantificação dos efeitos é, além de importante, desafiador, e requer análises de ordem multidisciplinar, envolvendo diversas áreas do conhecimento, a fim de obter formulações cada vez mais precisas e coerentes com a realidade.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem alguns objetivos mais específicos. Primeiro, é importante definir bem o objeto de estudo em questão. O estudo é baseado nos impactos decorrentes das ondas de choque das explosões químicas (vapor cloud explosions), tanto nas pessoas quanto nas estruturas.

Nesse aspecto, pode-se elencar alguns objetivos como sendo os principais desse trabalho:

- Descrever brevemente sobre o que são explosões químicas;
- Descrever o que é e quais os principais parâmetros característicos de uma onda de choque oriunda de explosão química;
- Apresentar quais os principais impactos nas pessoas e nas estruturas causados por essa onda de choque;
- Apresentar breve e superficialmente os modelos usados para a obtenção dos parâmetros da onda de choque;
- Apresentar o modelo de vulnerabilidade de Eisenberg (que usa as equações Probit) como uma das formas mais aceitas e largamente utilizadas na estimativa de impactos das explosões;
- Mostrar a aplicação dos modelos supracitados em um estudo de caso real.

1.3 Escopo

Para atender aos objetivos, o trabalho está estruturado em 5 capítulos. Primeiro, o capítulo 1, que é essa introdução, busca mostrar o que é esse trabalho, apontar seu objeto de estudo e os seus objetivos gerais, além de apresentar o seu escopo, mostrando como está dividido.

Após a introdução, o capítulo 2 traz a fundamentação teórica do trabalho. Esse capítulo significa uma síntese do que a literatura atual fala sobre o tema abordado, apresentando visões de diversos autores, bem como as explicações mais teóricas e definições dos conceitos essenciais para o entendimento do tema. Nesse âmbito, são definidos conceitos como o de explosões, onda de choque e os seus principais impactos, nas pessoas e estruturas.

Depois da apresentação e breve discussão da teoria, o capítulo 3 apresenta a metodologia usada, tanto para caracterização da onda de choque quanto para a estimativa dos impactos causados por ela. Com isso, essa metodologia é aplicada, e o capítulo 4 introduz os resultados dessa implementação.

Após essa caracterização, o capítulo 5, que é a conclusão, representa um fechamento do trabalho, onde são feitas as últimas considerações e análises a respeito dos resultados e da metodologia usada. Além disso, reitera-se nesse capítulo a importância do estudo feito, com sugestões de trabalhos futuros nessa área, a fim de melhorar continuamente os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Explosões químicas

Explosão é a liberação repentina e violenta de energia, para Lees (2001). Já para Lea (2002), é a geração e expansão repentina de gases associada com o aumento da temperatura capaz de causar danos estruturais. Além dessas, há muitas outras definições desse termo, de vários outros pesquisadores, mas quase todos são unânimes em dizer que é um processo súbito, repentino e violento. Explosões podem ter diversas causas e origens, e algumas são acidentais. Nesse grupo, esse trabalho estuda as explosões químicas, como o vapor cloud explosion (ou explosão da nuvem de vapor, numa tradução livre).

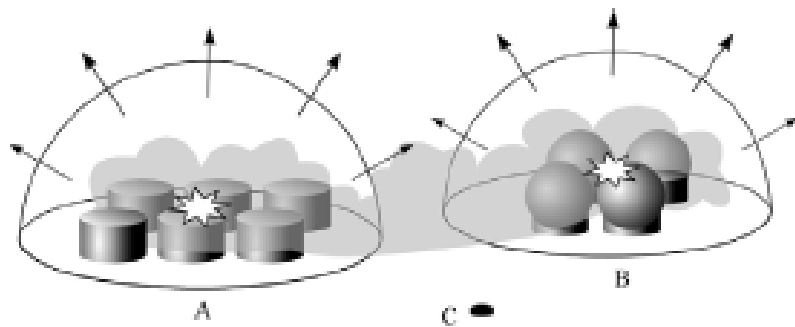
Esse tipo de explosão se caracteriza essencialmente pela formação de uma nuvem de vapor (advinda de um vazamento de gás ou de líquido que se vaporiza). Uma representação esquemática dessa situação é mostrada na figura 1. Para ocorrer a explosão da nuvem de vapor, são necessárias algumas condições mínimas. Primeiro, o material liberado precisa, além de ser inflamável, estar em certas condições de temperatura e pressão, e dentro da sua faixa de inflamabilidade. Além disso, é preciso que haja a formação da nuvem de vapor. Se o vapor ou líquido entrar em ignição instantaneamente, é provável que ocorra um incêndio (do tipo flash fire), ou seja, não deve gerar ondas de choque (efeitos mecânicos). Em geral, o tempo médio de ignição para formação da nuvem varia de 1 a 5 minutos.

Dessa forma, as condições para ocorrência dessa explosão da nuvem de vapor são muito dependentes das características do local. Não apenas as características de vento e umidade (que afetam diretamente a dispersão do gás), mas também a turbulência na propagação do gás. Quanto mais turbulento for esse escoamento da nuvem, mais drásticas serão as consequências, ou seja, os picos de sobrepressão tendem a ser maiores. Nesse sentido, a turbulência pode ser incrementada por três fatores:

- Liberação turbulenta do gás ou líquido, por exemplo, sob a forma de jato ou por uma falha catastrófica de um tanque.

- A expansão de gases recebendo calor em ambientes muito congestionados (fechados).
- Induzida por instalações industriais, como sistemas de ventilação, tubos trocadores de calor e aletas.

Figura 1 – Representação esquemática da ocorrência de um vapor cloud explosion.

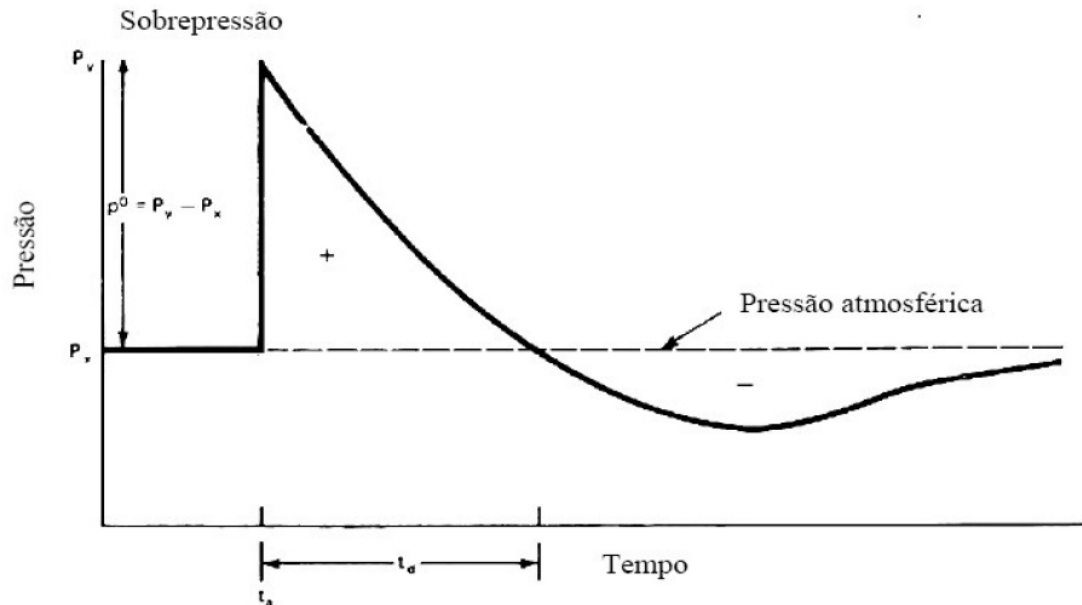


Fonte: Kakosimos, 2010

2.2 Onda de choque

Nas explosões, ocorre uma grande liberação de energia, que, em geral, é a conversão da energia química em outros tipos, como mecânica, térmica, sonora. A parcela de energia mecânica que vai para a atmosfera causa um impacto (pico de pressão), gerando uma grande compressão no gás circundante. Essa “frente de compressão” é transmitida às camadas subsequentes do gás, o que as empurra para frente, distanciando-as da fonte. Nos pontos atingidos pela onda, a pressão varia com o tempo, como mostra a figura 2.

Figura 2 – Representação gráfica da variação da pressão em função do tempo, em um ponto atingido por uma onda de choque.



Fonte: ZIMMERMANN, 2009

Inicialmente, quando a frente de compressão atinge o ponto, a pressão, que inicialmente era igual a atmosférica, aumenta bruscamente, até atingir um valor máximo, e depois seus valores decaem, até que a pressão volte a ser a atmosférica. Assim, verifica-se graficamente os parâmetros de interesse associados a onda de choque. Primeiro, a diferença entre a pressão máxima atingida e a pressão atmosférica corresponde ao chamado pico de sobrepessão (uma tradução da expressão inglesa *overpressure*), enquanto que o tempo no qual a pressão é superior à atmosférica é a chamada duração da fase positiva. A integração da função pressão ao longo da duração da fase positiva (que numericamente corresponde à área do gráfico até t_d) resulta em uma outra grandeza, chamada de impulso positivo. O pico de sobrepessão e o impulso são os parâmetros mais utilizados na estimativa dos riscos associados às explosões químicas, porque a maioria dos impactos causados depende diretamente dessas grandezas.

Nesse sentido, a quantificação da onda de choque consiste na determinação do pico de sobrepressão e do impulso positivo em pontos atingidos. Para isso, há diversos métodos, que são explorados brevemente na seção 3.1. Nas próximas seções, são mostrados os impactos causados, tanto nas pessoas quanto nas estruturas, sob uma ótica mais explicativa e teórica. A metodologia usada para estimar matematicamente esses impactos é apresentada posteriormente, na seção 3.2, com o modelo de vulnerabilidade de Eisenberg.

2.3 Impactos nas pessoas

De forma mais didática, esses danos causados podem ser classificados de duas formas: diretos (ou primários) e indiretos (subdivididos em secundários e terciários).

Os impactos primários são aqueles causados pelo impacto da pressão de compressão nas pessoas. Como o corpo humano é essencialmente água (um fluido incompressível), verifica-se que ele resiste relativamente bem aos efeitos da sobrepressão, à exceção das partes que contêm ar (pulmões e tímpanos), que podem ser esmagadas pela frente de compressão, trazendo problemas graves ou mesmo a morte. Além desses impactos diretos, a onda de choque também pode causar danos às pessoas pelo chamado deslocamento de corpo inteiro, ou seja, quando a frente de compressão arrasta o corpo da pessoa, que ao se chocar contra um anteparo pode até ter um efeito fatal. Esses impactos podem ser relacionados com o pico de sobrepressão, por exemplo, de uma forma mais genérica e simplificada, como mostra a tabela 1 a seguir:

Pico de sobrepressão (em bar)	Impactos causados
<0,01	Indivíduos seguros se dentro de edificações (longe de janelas) ou ainda deitados no chão em ambiente externo.
0,014 – 0,07	Danos prováveis por auto-impacto ou projeção de fragmentos.
>0,21	Corpo humano arremessado ao chão.
0,34	Ruptura dos tímpanos.
1	Danos aos pulmões.

Tabela 1 – Possíveis impactos nas pessoas em função apenas do pico de sobrepressão da onda de choque.

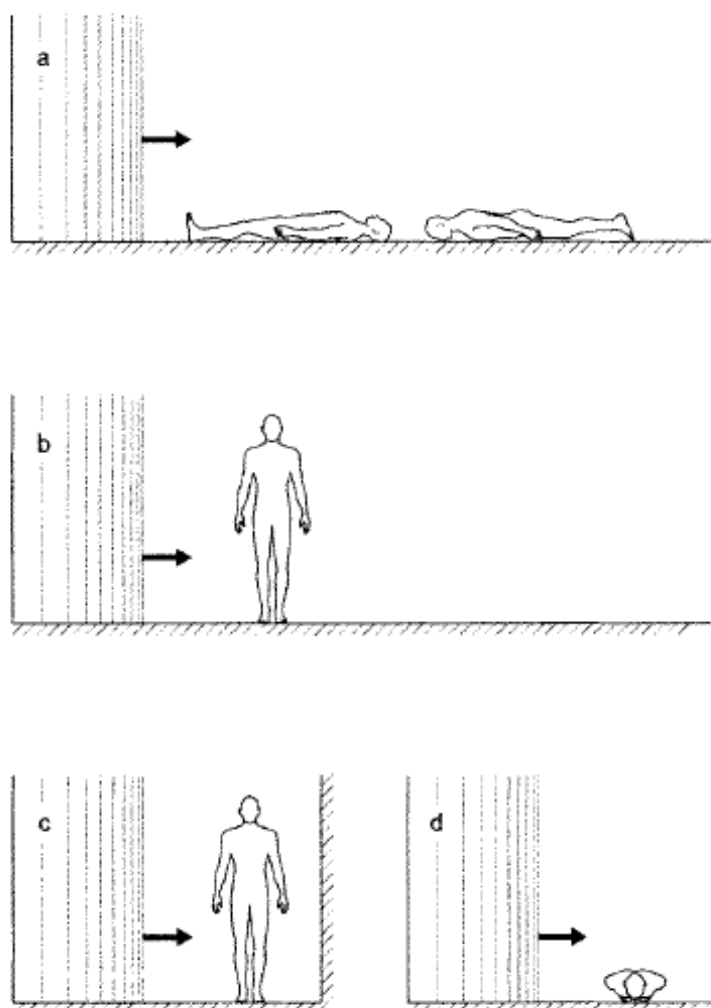
Fonte: Adaptado de CASAL, 2008

É bastante complicado prever as consequências de uma explosão química com absoluta certeza, pois são muitas variáveis envolvidas. No caso do deslocamento de corpo inteiro, por exemplo, parece um consenso que ao se chocar com uma velocidade de cerca de 40 m/s a um anteparo sólido, a chance de morte é quase 100% (CASAL, 2008). Contudo, isso depende muito da parte do corpo que se choca ao anteparo, ou mesmo da forma do obstáculo. Assim, é preciso ressaltar que existem modelos diversos (como o de Eisenberg, objeto de estudo da seção 3.2) para estimar os impactos matematicamente, e não quantificá-los com exatidão.

Além disso, a própria posição do corpo ao receber a frente de compressão influencia na gravidade dos impactos. Os parâmetros da onda de choque dependem fundamentalmente da distância que o indivíduo se encontra da fonte causadora da explosão; quanto mais próximo, mais intensos são os efeitos.

Contudo, além da distância, a presença de um obstáculo pode causar uma reflexão da onda, elevando ainda mais a pressão que atinge o indivíduo. Uma pessoa que está em pé, encarando a fonte explosiva, sofre uma maior pressão de compressão do que aquela deitada, pois em pé soma-se a sobrepressão da onda a pressão dinâmica do vento. A influência da posição é mostrada na figura 3 abaixo:

Figura 3 – Possibilidades de interação da onda de choque com uma pessoa.



Fonte: CASAL, 2008.

Para a posição a indicada na figura 3, a pressão que a pessoa recebe é apenas o pico de sobrepressão da onda. Quando a pessoa está em pé, soma-se a esse valor o efeito dinâmico da pressão do vento circundante, como mostra a equação 1:

$$P = \Delta P + P_w = \Delta P + \frac{5\Delta P^2}{2\Delta P + 14 \cdot 10^5}$$

Equação 1 – Pressão total sofrida por um indivíduo em pé, recebendo diretamente a frente de compressão.

Fonte: CASAL, 2008

Já nas posições c e d, a pressão ainda é somada a parcela refletida pelo anteparo, incrementando assim ainda mais o valor da pressão sofrida nesses casos, como mostra a equação 2:

$$P = P_r = \frac{8\Delta P^2 + 14\Delta P \cdot 10^5}{\Delta P + 7 \cdot 10^5}$$

Equação 2 – Pressão total sofrida por um indivíduo em pé, recebendo diretamente a frente de compressão e da parcela refletida pelo anteparo.

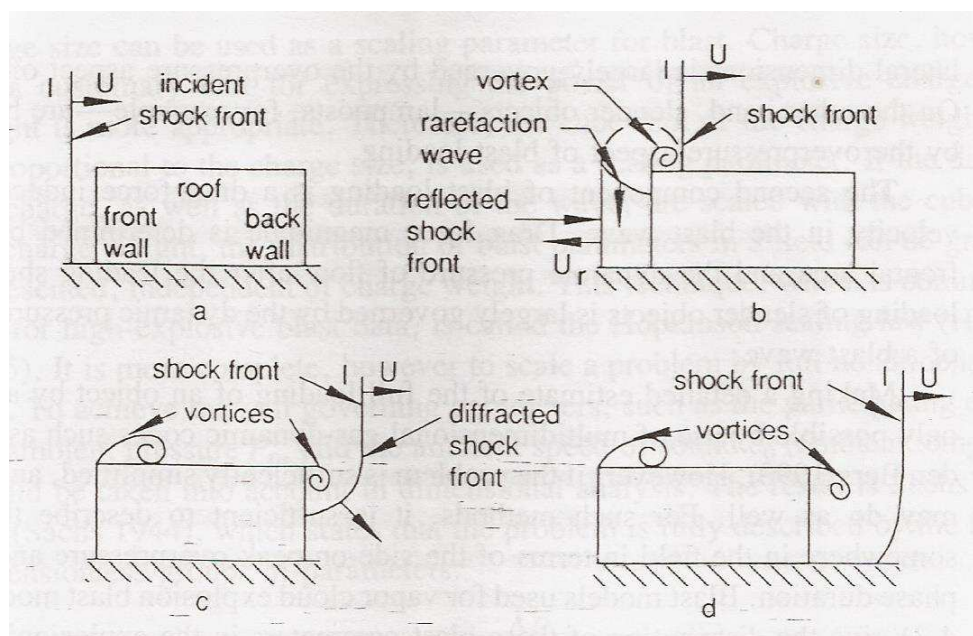
Fonte: CASAL, 2008

Nesse âmbito, conclui-se que a posição mais segura é a indicada pela letra a na figura 3, por corresponder ao menor valor de pressão sofrido pela pessoa.

2.4 Impactos nas estruturas

Quando atingem as estruturas, as ondas de choque funcionam como carregamentos adicionais sobre elas. Nesse âmbito, um dos maiores interesses no caso de explosões é verificar o quanto essas cargas adicionais afetam a estrutura, ou seja, quais as consequências que eles podem trazer. Antes de tentar responder a esses questionamentos, é importante entender melhor sobre como a onda de choque interage com a estrutura rígida. A figura 5 é um modelo proposto por Baker (BAKER, 1973) para mostrar o que ocorre:

Figura 4 – Interação da onda de choque com uma estrutura rígida



Fonte: BAKER, 1973.

Observa-se, na figura 4, quatro estágios, indicados pelas letras de a,b,c e d. Na primeira fase, letra a, a frente de onda ainda não atingiu a estrutura. Ao atingi-la, além da carga gerada pela própria onda, o movimento do ar ainda gera uma outra pressão adicional, a pressão dinâmica. Na fase seguinte, indicada pela letra b, a frente de onda atinge frontalmente a estrutura, e nesse momento ocorrem, simultaneamente, diversos fenômenos: reflexão, difração e rarefação da onda incidente, e a frente de onda continua seu caminho, passando por cima da estrutura, caracterizando o fenômeno da difração (que está associado a capacidade da onda em contornar obstáculos).

Ainda nessa análise, um parâmetro de grande importância é a pressão refletida, pois devido à reflexão de parte da onda, verifica-se um aumento da pressão na região frontal. Contudo, essa pressão refletida vai sendo continuamente atenuada pela rarefação lateral (ver figura 4, letra b). Na letra c da mesma figura, observa-se que a pressão refletida já foi toda dissipada, e parte de cima da estrutura recebe apenas a pressão máxima da onda de choque incidente. Assim, a frente de onda já terminou sua difração, e a estrutura atrás dela sofre os efeitos da força de arrasto (os vórtices mostrados na figura).

Após essa exposição, fica claro que essa análise da interação da onda com a estrutura não é simples. Verifica-se que há muitos parâmetros envolvidos, associados a atmosfera do local, ligados às dimensões da estrutura, ao pico de sobrepressão. De forma mais genérica, pode-se dizer que as estruturas com maiores dimensões laterais são mais afetadas pelo pico de sobrepressão da onda, enquanto que estruturas mais esbelta (de menores dimensões laterais, como postes, por exemplo) são mais afetadas pela componente de pressão dinâmica.

Sendo assim, percebe-se que o cálculo dessas pressões atuantes (a refletida e a dinâmica) são de grande importância na análise da resposta das estruturas. Há diversas expressões matemáticas para essa finalidade, propostas por GLASSTONE e DOLAN, 1977. Para o caso de ondas “fracas”, ou seja, com baixos picos de sobrepressão, observa-se a convergência dessa pressão refletida para o dobro da pressão máxima, enquanto que se a onda tiver picos

de sobrepressão mais elevados, a pressão refletida pode chegar a até oito vezes o valor da pressão máxima.

Dessa forma, pode-se pensar em, basicamente, duas análises para o cálculo dos impactos nas estruturas: uma por métodos analíticos (simplificados, afinal o problema é muito complexo, envolve muitas variáveis) e outra por métodos mais empíricos, sobretudo tabelas, baseadas em dados experimentais e reais acumulados durante anos de pesquisas nessa temática de explosões. Os métodos analíticos ainda não estão tão desenvolvidos, mas já existem alguns na literatura. Eles usam uma análise dinâmica da estrutura, ou seja, a pressão excessiva causa uma vibração, de modo que a estrutura está sujeita, então, a uma oscilação.

Assim, a estrutura está sujeita a um sistema de vibração forçada, com amortecimento. É importante ressaltar que essa análise é, de fato, bastante complexa, e há diversos modelos matemáticos, analíticos e numéricos para auxiliar na determinação dos parâmetros necessários a essa análise. Essa formulação não será apresentada, pois não é de interesse direto desse trabalho.

De forma mais simplificada, pode-se avaliar os impactos nas estruturas por meio dos métodos empíricos, que se constituem como tabelas diversas, baseados, fundamentalmente, nos parâmetros fundamentais das ondas de choque: o pico de sobrepressão (overpressure) e no impulso da fase positiva. Para uma estimativa mais fidedigna, é necessário levar em conta ambos os efeitos (como mostra a seção 3.2); contudo, para fins de uma análise mais geral e imediata, há diversas tabelas na literatura que relacionam essencialmente o pico de sobrepressão com os possíveis danos sofridos pelas mais diversas estruturas e edificações. Uma dessas tabelas é apresentada a seguir.

Pico de Sobrepressão (em bar)	Consequências
0,0015	Ruído imitante
0,002	Quebra ocasional de grandes janelas já sujeitas à tensão
0,003	Ruído bastante elevado; quebra ocasional de janelas e vidros.
0,007	Quebra de pequenas janelas.
0,01	Limite típico de quebra de janelas
0,02	Danos ao teto das casas.
0,03	Danos estruturais de menor intensidade.
0,035-0,07	Danos e quebras ocasionais às armações das janelas.
0,08	Demolição parcial de residências (que se tornam inabitáveis).
0,07-0,15	Painéis de alumínio ou madeira são arrastados e quebram.
0,1	Painéis metálicos são levemente entortados.
0,15	Colapso parcial de paredes e cobertas de casas.
0,15-0,2	Paredes de alvenaria estrutural ou concreto simples quebram.
0,18	Limite inferior dos danos estruturais mais sérios.
0,2	Máquinas industriais pesadas sofrem danos e estruturas metálicas mais leves são arrancadas das fundações e entortadas.
0,2-0,28	Colapso de estruturas metálicas leves e ruptura de tanques de armazenamento de óleo.
0,2-0,4	Derrubada de árvores de grande porte.
0,3	Arrancamento dos revestimentos de edificações industriais.
0,35	Destruição da maior parte das edificações (exceto algumas de concreto) e deslocamento de carros e caminhões.
0,35-0,4	Deslocamento e falha de tubulações industriais.
0,35-0,5	Destruição quase completa de casas.
0,4-0,55	Colapso de tubulações industriais.
0,5	Colapso de paredes em alvenaria simples (de até 30 cm de espessura) e capotamento de vagões de trem.
0,5-0,55	Quebra de paredes em alvenaria simples (de até 35 cm de espessura), por flexão ou cisalhamento.
0,6	Destruição total de vagões de trem carregados.
0,7	Provável destruição total de edificações; máquinas pesadas severamente danificadas.

Tabela 2 – Impactos da sobrepressão nas estruturas.

Fonte: Adaptado de CASAL, 2008.

3 MÉTODOS

3.1 Obtenção dos parâmetros da onda de choque

Após definir e mostrar as condições de ocorrência da explosão de nuvem de vapor (vapor cloud explosion), essa seção visa mostrar alguns métodos para quantificação dos parâmetros da onda de choque. Para calcular os efeitos da explosão de nuvem de vapor, há duas abordagens principais: os métodos de equivalência com o TNT e o método multienergia, cada uma com suas vantagens e desvantagens, e aplicações específicas. A primeira abordagem se baseia no pressuposto de que o potencial explosivo está ligado à quantidade total de combustível presente na nuvem de vapor, independente de estar dentro ou não dos limites de inflamabilidade. Baseados nesse fundamento, diversos métodos propõe equivalências entre a quantidade de combustível presente na nuvem e a quantidade de TNT com o mesmo potencial explosivo, por isso a ideia de equivalência. Dessa forma, a base de todos esses métodos é determinar quanto de TNT equivale a quantidade de combustível da nuvem, o que os diferencia é como ocorre essa equivalência, as expressões matemáticas usadas para determiná-la.

Nesse sentido, o explosivo TNT (Trinitrotolueno) foi escolhido como parâmetro de cálculo por ser um dos mais conhecidos e largamente utilizados em diversas indústrias, não só com finalidade militar, mas também civil (demolições, por exemplo). Esse conjunto de métodos, portanto, considera que a quantidade de combustível na nuvem é o principal parâmetro para determinação do potencial explosivo associado.

Em contraposição a esses métodos, o método Multienergia (VAN DEN BERG, 1985) está pautado em outra ideia, que é bastante consensual dentre os pesquisadores: a de que as condições do ambiente é que são os principais indicadores do potencial destrutivo das explosões, pelo menos no caso específico das nuvens de vapor. Assim, é preciso que haja relativa turbulência nas condições de propagação do gás para que ocorram ondas de choque consideráveis. É possível observar, então, que nesse método a quantidade de

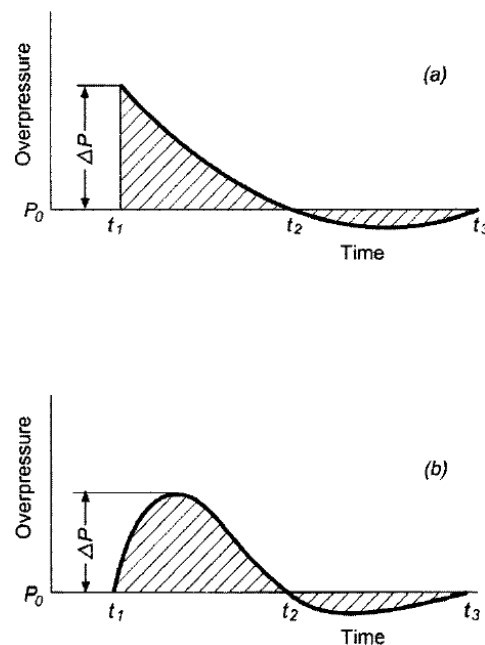
combustível é uma informação secundária. O método multienergia considera a existência de áreas de turbulência dentro da propagação da nuvem de vapor, determina a energia associada a cada uma delas e soma seus efeitos nos pontos em questão, para obter os parâmetros das ondas de choque.

Sendo assim, é aceitável afirmar que os métodos acima discutidos levam a diferentes caminhos. São dois diferentes modelos e formas de interpretação de um mesmo fenômeno, de modo que não existe certo e outro errado; o que se verifica é que cada um dos métodos tem um determinado campo de aplicação. O modelo baseado na equivalência com o TNT é interessante para se obter o potencial destrutivo da explosão da nuvem de vapor, ou seja, para obter informações menos precisas e mais de ordem genérica.

Contudo, para se estudar o impacto desses efeitos nas estruturas, por meio da análise estrutural, os valores obtidos pelos métodos de equivalência com o TNT não são tão interessantes, porque as ondas de choque produzidas pelo TNT possuem formas diferentes, bem como elevadas amplitudes e durações reduzidas quando comparadas às ondas produzidas por explosão de gás. Pode-se dizer, então, que a explosão do TNT se assemelha mais à um processo de detonação, com ondas de choque de velocidades supersônicas, enquanto que nas explosões químicas se verifica uma maior proximidade ao processo de deflagração, com ondas de velocidade subsônica. Essa diferença é mostrada graficamente na figura 5 abaixo.

Conforme será mostrado na seção seguinte, a boa caracterização da onda de choque é essencial para uma análise estrutural mais precisa e coerente. Assim, para esses casos é preferível o uso do modelo proposto por Van Den Berg, com o seu método multienergia, para obtenção mais precisa de parâmetros como forma, amplitude e duração da onda de choque.

Figura 5 – Diferentes formas de onda nos processos de: Detonação (figura a, mais próximo das explosões de TNT) e deflagração (figura b, mais próxima dos vapor cloud explosions).



Fonte: CASAL, 2008.

Entretanto, para fins de cálculo, os métodos de equivalência são bem mais simples. Como já foi dito, esse conjunto de métodos se baseia no mesmo pressuposto, e as diferenças estão nas expressões empíricas. Dessa forma, nesse trabalho será mostrado o conjunto de equações, ábacos e procedimentos de aplicação para um desses métodos, e esse raciocínio pode ser generalizado para os demais. O método usado é recomendado pelo Health and Safety Executive, do Reino Unido (HSE 1979; HSE 1986).

O método é bastante simples. Inicialmente, é preciso conhecer (ainda que de forma estimada) a quantidade de combustível liberado (vazado de tanques ou tubos, por exemplo). Contudo, a quantidade de combustível na nuvem de vapor deve ser menor do que o que foi liberado (no máximo, igual), e para determinar essa quantidade é necessário conhecer alguns dados termodinâmicos do combustível. A maior parte desses valores é tabelada, inclusive algumas

dessas tabelas são aqui apresentadas. Conhecida a quantidade de combustível na nuvem, basta usar uma correlação empírica para calcular a quantidade equivalente de TNT, em massa. Com essa quantidade equivalente, para cada distância real do centro da explosão, é possível determinar uma distância equivalente (adimensional), e com esse valor, usa-se o ábaco para relacioná-lo com o valor do pico de sobrepressão.

Essa sequência de passos, equações e ábacos corresponde aos métodos de equivalência com o TNT. Pode-se, portanto, construir tabelas com as distâncias reais do centro da explosão e os seus respectivos picos de sobrepressão atuantes. É importante ressaltar que esse método é bastante simplificado, e não permite a obtenção de outros parâmetros importantes da onda de choque, como a duração da fase positiva. Assim, esses resultados finais do ábaco servem muito mais para uma análise mais generalista, para obter uma visão geral dos possíveis danos, e não, por exemplo, para uma análise estrutural de uma peça.

Método multienergia

Apesar de também ser um método bastante simples, sobretudo do ponto de vista matemático, o método proposto por Van Den Berg fornece mais dados da onda de choque, sendo, portanto, mais completo. Contudo, esse método requer, pelo menos inicialmente, uma análise mais cuidadosa, para definição das áreas potencialmente explosivas dentro da nuvem de vapor. Essas áreas são, em geral, regiões confinadas ou que proporcionem algum aumento de turbulência na nuvem. O estabelecimento delas é parte fundamental do método Multienergia. Dessa forma, a seguir são dados alguns exemplos clássicos, que são comuns a diversas plantas de indústrias:

- O espaço abaixo dos tanques de armazenamento, que confina parte da nuvem;
- O estacionamento de veículos, especialmente se estiver lotado, também gera um relativo aumento na turbulência, por confinar o gás;
- O jato de vazamento, pelo qual o líquido ou gás está escapando.
- A porção restante da nuvem, ou seja, a parte menos confinada, mais “espalhada”, em regime menos turbulento.

De forma mais genérica, pode-se pensar nessas áreas potencialmente explosivas como sendo locais densamente ocupados e os espaços abaixo e entre esses locais, além dos jatos de vazamento, no caso de furo em tanque ou tubo. Além disso, para cada uma dessas áreas deve ser associado (para fins de cálculos e comparações ao fim do método) um valor de força explosiva, que varia de 1 (muito fraco) a 10 (muito forte). Essa escolha é fundamental porque o ábaco do método apresenta os valores em função da distância e desse parâmetro avaliativo. No exemplo acima, representado na figura 11, adota-se o valor 7 para todas as áreas, exceto a parte espalhada, cujo valor adotado é pequeno, 2, por exemplo. Esses valores estão diretamente ligados ao grau de turbulência e, conseqüentemente, aos potenciais danos que as explosões de cada parte pode causar. O uso do valor máximo é algo bastante conservador e à favor da segurança.

Definidas essas áreas potencialmente explosivas, o próximo passo é, provavelmente, um dos mais complexos do método, por requerer análises mais subjetivas. É necessário avaliar o volume de gás da nuvem associado a cada uma dessas áreas, a fim de calcular a energia que cada área contribui. Esse volume é, em geral, estimado como sendo o volume do espaço que ele ocupa, e essa determinação nem sempre é de forma tão direta e simplificada.

Entretanto, após essa parte mais complexa de determinação dos volumes, a parte restante do método é bem mais simples e direta. Calculam-se, então, as energias associadas a cada área pré-definida, o que é obtido por um simples produto entre o volume estimado de gás e o valor da energia por volume associada ao combustível, que é largamente usado na literatura como 3,5

MJ/m³. Esse valor é uma média obtida considerando os hidrocarbonetos mais comuns da indústria, e é considerado como bastante representativo.

Com as energias de cada área, basta determinar diretamente os efeitos das ondas de choque (parâmetros de pico de sobrepressão e duração da fase positiva) nas distâncias que se deseja. Novamente, pode-se construir a tabela com as distâncias e os efeitos. Destaca-se que por esse método são calculados os parâmetros resultantes de explosões das áreas separadamente, ou seja, os efeitos são obtidos de forma independente entre as áreas.

Nesse ponto, pode-se destacar também que, como será mostrado nos ábacos a seguir, o método multienergia também considera a ocorrência de ondas de choque com diferentes formas, que são representadas pelas linhas cheias, pontilhadas e tracejadas nos ábacos (ver legenda do gráfico 4). Isso é importante, pois conforme foi mostrado na seção 2.1.4, a boa e completa formulação da onda de choque é essencial para o entendimento da interação dela com as estruturas.

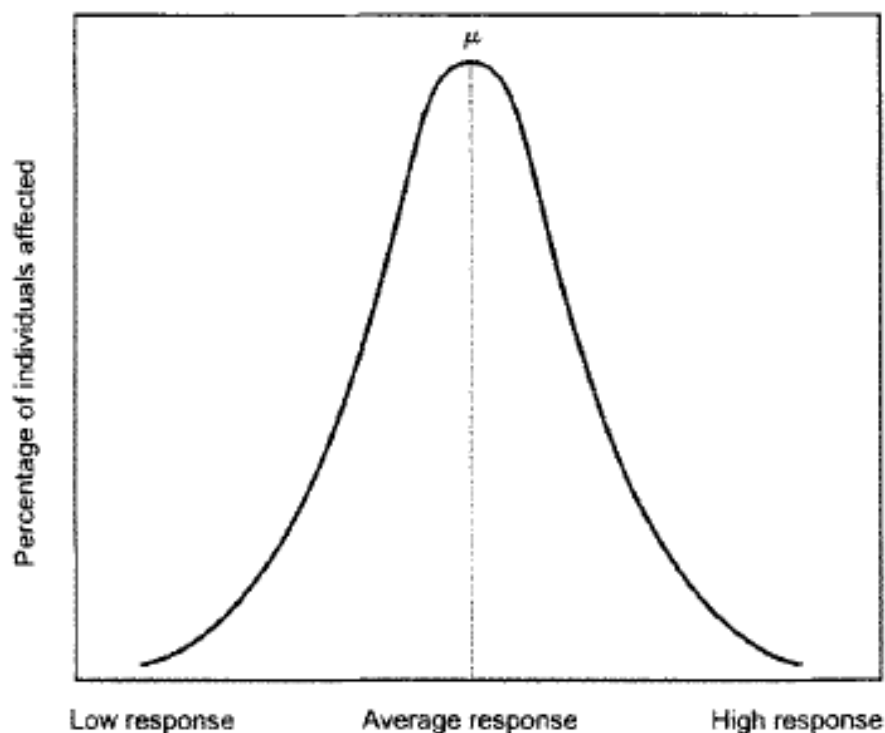
É importante também realçar que nesse método tanto o pico de sobrepressão quanto a duração da fase positiva também são obtidos de forma escalonada, e a obtenção dos valores reais é obtida por meio de equações de ajuste.

3.2O modelo de vulnerabilidade de Eisenberg

Esse é um dos modelos mais aceitos e usados na atualidade para estimar os impactos das explosões. Na verdade, ele é usado de maneira mais ampla, para estimar também impactos térmicos ligados a incêndios, ou mesmo à propagação de substâncias tóxicas. Contudo, nesse trabalho é mostrado apenas o foco nos impactos das ondas de choque, ou seja, nos impactos causados por explosões.

Apesar de ser bastante eficaz, é um modelo relativamente simples, que está fundamentada na tese de que os indivíduos sujeitos a um evento (no caso, explosão) não respondem todos da mesma forma aos efeitos:

Figura 6 – Resposta dos indivíduos aos efeitos.



Fonte: CASAL, 2008.

Na distribuição das respostas, observa-se que a maior parte dos indivíduos reage de maneira intermediária, e que as minorias respondem de formas muito diferentes (melhores ou piores). Essa distribuição de probabilidades corresponde a uma das famosas e usuais da estatística: a distribuição normal ou Gaussiana. Dessa forma, pode-se entender a estimativa dos impactos como o cálculo de uma probabilidade de ocorrência, por meio da integração da função densidade de probabilidade da magnitude de um evento (como pico de sobrepressão de uma onda de choque, por exemplo) com o grau de dano que ela causa.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

Equação 3 – Função densidade de probabilidade, que relaciona a magnitude de um evento com o grau de dano causado por ele.

Fonte: CASAL, 2008.

A fim de simplificar e tornar mais conveniente e direto o processo de estimativa, obtém-se, via linearização e ajustes estatísticos, a ferramenta que simplifica o processo: o uso das variáveis Probit, mostrado na equação 4.

$$Y = a + b \cdot \ln V$$

Equação 4 – Variável Probit (Y) em função da magnitude do evento (V).

Fonte: CASAL, 2008.

As variáveis (ou funções) Probit usadas estão sempre no formato da equação 4, e são usadas diretamente para estimar o grau de impacto dos mais diversos eventos. Os coeficientes *a* e *b* são empíricos, ou seja, obtidos experimentalmente, e dependem basicamente do evento e do dano causado. Assim, existem diferentes variáveis Probit para expressar os distintos impactos, tanto em estruturas quanto em pessoas. A variável magnitude do evento pode ser, no caso das explosões, simplesmente o valor do pico de sobrepressão, na

maior parte dos casos, ou então uma combinação empírica entre os valores de pico e impulso positivo. Algumas das principais funções Probit usadas na estimativa de impactos das explosões são apresentadas abaixo:

Função	Magnitude do evento	Dano avaliado
$Y = -77,1 + 6,91 \times \text{LN}(P)$	P – Pico de sobrepressão (N/m ²)	Percentual de letalidade por hemorragia pulmonar.
$Y = -12,6 + 1,524 \times \text{LN}(P)$	P – Pico de sobrepressão (N/m ²)	Percentual de dano aos tímpanos.
$Y = 5 - 8,49 \times \text{LN}(S)$	$S = \frac{2,43 \times 10^3}{\Delta P} + \frac{4 \times 10^8}{\Delta P * i}$ ΔP – Pico de sobrepressão (N/m²) i – Impulso positivo (N*s/m²)	Percentual de sobrevivência a um impacto na cabeça.
$Y = 5 - 2,44 \times \text{LN}(S)$	$S = \frac{7,38 \times 10^3}{\Delta P} + \frac{1,3 \times 10^9}{\Delta P * i}$ ΔP – Pico de sobrepressão (N/m²) i – Impulso positivo (N*s/m²)	Percentual de sobrevivência a um deslocamento de corpo inteiro.

Tabela 3 – Funções Probit mais comuns para impactos nas pessoas.

Fonte: Adaptado de CASAL, 2008.

Função	Magnitude do evento	Dano avaliado
$Y = 5 - 0,22 \times \text{LN}(V)$	$V = \left(\frac{40000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{i} \right)^{11,3}$ ΔP – Pico de sobrepressão (N/m²) i – Impulso positivo (N*s/m²)	Percentual de colapso total de uma edificação de até 4 andares.
$Y = 5 - 0,26 \times \text{LN}(V)$	$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{i} \right)^{9,3}$ ΔP – Pico de sobrepressão (N/m²) i – Impulso positivo (N*s/m²)	Percentual de ocorrência de grandes danos estruturais.

Tabela 4 – Funções Probit mais comuns para impactos nas estruturas.

Fonte: Adaptado de CASAL, 2008.

Sendo assim, ressalta-se que o uso das funções Probit é bastante simples; primeiro, calcula-se os parâmetros da onda de choque, usando algum método da seção 3.1. Se for necessário o impulso positivo, então é necessário usar o multienergia; caso seja preciso apenas o valor do pico de sobrepressão, o método de equivalência pode atender bem. Com os parâmetros da onda de choque, calcula-se os valores das respectivas variáveis Probit. Contudo, essa função não expressa diretamente o percentual, pois a relação não é linear; assim, faz-se necessário o uso da tabela 5 abaixo para relacionar os valores Y com os respectivos percentuais:

%	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	3.82	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	6.34	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

Tabela 5 – Tabela relacionando o percentual de um dano qualquer com o valor da variável Probit correspondente.

Fonte: CASAL, 2008.

4 RESULTADOS

4.1 Breve contextualização

Em complemento ao viés teórico apresentado, esse capítulo visa, fundamentalmente, mostrar e debater sobre como é feita a quantificação dos efeitos mecânicos dessas explosões na prática. Para tanto, foram escolhidos dois cenários reais de acidentes de indústrias petroquímicas, que serão analisados sob a ótica dos métodos empíricos apresentados no capítulo 3 e também com o auxílio de um software de gerenciamento de riscos, o ALOHA, desenvolvido pelo governo americano, com a finalidade de simular situações de acidentes diversos, como explosões, incêndios e vazamentos de substâncias tóxicas.

Dessa forma, para os dois casos apresentados, são feitas análises tanto pelos métodos quanto pelo software, e os objetivos primordiais são, além de ilustrar com aplicações práticas a teoria previamente apresentada, comparar e discutir esses resultados; em resumo, pode-se dizer que essa parte do trabalho está pautada em avaliar, quantitativamente, a relação entre essas duas abordagens do mesmo problema, a fim de mostrar os pontos divergentes e concordantes entre elas, além de tentar explicar as diferenças observadas.

Essa descrição dos parâmetros da onda de choque, em especial do pico de sobrepressão, é o principal elemento no estudo do potencial destrutivo e das consequências ligadas às explosões do tipo Vapor Cloud. Nesse sentido, os estudos de casos, assim como os métodos empíricos e o próprio ALOHA, tem como principal saída tabelas, que mostram os valores de sobrepressão em distâncias significativas do centro da explosão. Com esse parâmetro, pode-se estimar, com base nas funções Probit do modelo de Eisenberg, os impactos potenciais ou danos esperados com o evento, e com esse produto é possível trabalhar mais aprofundadamente no gerenciamento e prevenção dos riscos.

Apesar disso, é de suma importância ressaltar que essas análises de riscos estão bastante simplificadas aqui nesse trabalho, pois aqui os fins são meramente de pesquisa e de estudo. De modo geral, a análise da situação na realidade é muito mais complexa; primeiro, porque envolve um número muito maior de variáveis, e segundo porque não é feita de forma separada, como nesse trabalho. Os efeitos térmicos e mecânicos, para um caso real, precisam ser considerados em conjunto, bem como possíveis vazamentos de gás; além disso, os próprios eventos tendem a não ocorrer separadamente, ou seja, associado a um vapor cloud podem ocorrer outros eventos indesejados, como incêndios, por exemplo.

Contudo, como nesse trabalho a finalidade é apenas apresentar de maneira introdutória e básica o processo de estimativa dos impactos causados por uma onda de choque de explosão química; assim, faz-se uma análise bastante simplificada e fragmentada. Pode-se dizer então que esse trabalho corresponde ao começo de uma pesquisa, não devendo ser usado diretamente para aplicações reais, pois não é essa a sua finalidade.

Os cenários para os casos 1 e 2, que vem a seguir, são típicos da indústria petroquímica. Grandes tanques, de formas esférica e cilíndrica, predominantemente, armazenam combustíveis, gases comprimidos e líquidos do refino do petróleo. Apesar de estarem muitas vezes sujeitos a pressões dezenas de vezes maiores do que a atmosférica e em contato direto com líquidos reativos, esses recipientes são muito resistentes, e em geral resistem bem; a maior das falhas tende a ocorrer nas tubulações, seja por falha mecânica, ou de projeto (material erroneamente especificado, por exemplo) ou ainda na montagem.

Esses tanques em geral não estão isolados, e sim próximos de muitos outros, com o mesmo conteúdo ou não. Além desses tanques, muitos outros componentes estão suspensos por estruturas, metálicas ou até de concreto armado ou protendido.

Há também locais de trabalho para pessoas, como centros de comando ou usinas. Assim, além de todo esse maquinário pesado, existem também locais com seres humanos. Essa caracterização é importante para compreender melhor os possíveis efeitos e consequências de explosões nesses locais; além da destruição direta das estruturas, pode haver também a formação de novos acidentes, pela geração de novos vazamentos ou destruição de suportes, por exemplo. Os próprios revestimentos e vidros podem causar novos acidentes ao ser atingidos por ondas de choque.

Nesse íterim, pode-se afirmar que o conhecimento da planta e das instalações ao redor de um possível ponto de explosão são fundamentais na análise e gerenciamento de riscos. Além de toda essa destruição física direta, os efeitos mecânicos ainda podem causar efeitos diretamente nos humanos (como foi mostrado na seção 2.3), danificando órgãos mais frágeis como os tímpanos, os pulmões ou mesmo o crânio, com o impacto.

Existem, também, outros parâmetros de interesse na região, como, por exemplo, as características atmosféricas e meteorológicas, como temperatura, pressão, umidade relativa do ar, ocorrência ou ausência de nuvens, entre outros elementos. Quase todos esses parâmetros são dados de entrada para o software ALOHA, e também para os métodos empíricos.

4.2 Resultados da análise

Esse primeiro caso a ser trabalhado se refere ao rompimento de uma tubulação de descarga de um compressor, liberando cerca de 20.000 kg de propano. Nesse momento, tanto a pressão interna quanto a temperatura estavam bem elevados, mas foi possível determinar, além desses parâmetros básicos, a quantidade de massa de gás que vazou. Com esses parâmetros, combinados com as propriedades termodinâmicas tabeladas do gás, foi possível usar os métodos empíricos para quantificar a onda de choque associada ao vapor cloud ocorrido.

Esse evento foi caracterizado usando os métodos de equivalência com o TNT e o multienergia, assim como o software ALOHA. Para executar os

métodos, foram utilizadas rotinas do Mathcad, que estão contidas nos anexos desse trabalho, bem como as páginas de dados e saídas do ALOHA.

É importante destacar que a aplicação do método Multienergia (Van Den Berg 1985), apesar de aparente mais simples, é um pouco mais complicado do que o do TNT por requerer uma análise mais subjetiva a respeito do modo como a nuvem se propaga na região. Contudo, como não se dispõe da planta e nem se sabe exatamente o que está ao redor do local da explosão, adota-se que toda a nuvem está parcialmente confinada na região do vazamento, uma tubulação; adota-se, então, o fator 5 de confinamento, o que é bastante conservador. Na realidade, é muito provável que a maior parte da nuvem se espalhe pela atmosfera de forma não confinada, ou seja, com o fator de confinamento baixo (em torno de 2, por exemplo), de modo que parece bem mais conservador o procedimento adotado.

Em suma, pode-se indicar o seguinte resultado, sob a forma da tabela 6:

CASO 1 - Resumo dos Resultados			
Região	Método TNT	Método Multienergia	ALOHA
A	72m	-	-
B	116m	-	146m
C	295m	300m	196m

.Tabela 6 – Resumo dos resultados para o caso 1.

As regiões A, B e C correspondem a valores de sobrepressão pré-definidos pelo ALOHA: A é 8 psi (0,55 bar), B é 3,5 psi (0,24 bar) e C é 1 psi (0,07 bar). Os valores em bar passam uma ideia mais realista a respeito dos danos potenciais que esses picos podem causar. As distâncias indicadas são tomadas em relação ao ponto da ocorrência da explosão, na direção do vento, e significam valores a partir dos quais as sobrepressões não ultrapassam os valores das regiões A, B e C. Nesse trabalho, foram apresentadas tabelas que correlacionam o pico de sobrepressão com os prováveis efeitos, na seção 2.4.

Nesse sentido, essas regiões servem como expressão para a análise e o gerenciamento de riscos. A região A, com as maiores sobrepressões, corresponde à destruição total (de acordo com as tabelas e com o próprio software ALOHA), a B está ligada a danos mais sérios às estruturas, enquanto que a C é a mais ampla, são danos moderados a leves (quebra de vidros de janelas ou das esquadrias, por exemplo).

O segundo caso é um dos mais famosos vapor clouds já ocorridos, corresponde ao acidente em Flixborough, no Reino Unido. Nesse acidente, cujos impactos puderam ser sentidos a quilômetros de distância, uma massa de aproximadamente 100.000 kg de ciclohexano vazou por uma tubulação, causando a nuvem e a consequente explosão. Os resultados para essa análise estão na tabela 7:

CASO 2 - Resumo dos Resultados			
Região	Método TNT	Método Multienergia	ALOHA
A	100m	-	-
B	167m	-	248m
C	418m	600m	343m

Tabela 7 – Resumo dos resultados para o caso 2.

Com os resultados resumidos, é possível fazer algumas análises. Primeiro, os valores obtidos confirmam todo o embasamento teórico do capítulo 3. O método de equivalência com o TNT obteve valores mais elevados de sobrepressão nos pontos mais próximos da explosão, o que está evidenciado pela região A estar claramente delimitada. Nem o ALOHA nem o método multienergia previram uma região A. Assim, esses resultados apenas corroboram o fato de que a onda de choque produzida pelo TNT difere muito dos combustíveis mais comuns da indústria química sobretudo no chamado Near Field, ou seja, nos pontos mais próximos do evento. Isso se deve a essa onda de choque do TNT possuir elevados picos de sobrepressão, comparativamente, e tempos menores na fase positiva, sendo, pois, ondas

mais curtas e de maior amplitude. Esse comportamento se traduz numericamente como as elevadas sobrepressões iniciais encontradas, para ambos os casos. Nesse sentido, em consonância com a teoria apresentada, percebe-se que o fator mais relevante nos métodos de equivalência é a quantidade de combustível que vaza, ou a massa de gás liberada para a nuvem, independente das condições de confinamento.

Entretanto, para o método multienergia o raciocínio é distinto: a quantidade de gás em si é secundária, e o principal parâmetro determinante é o grau de confinamento. Como nos dois casos a nuvem de vapor formada foi considerada com um baixo fator de confinamento, é de se esperar, apesar das massas bastante elevadas, que os picos de sobrepressão sejam menores do que os calculados pelos métodos de equivalência. Contudo, percebe-se que esses métodos convergem para valores mais próximos à medida que os pontos se afastam do centro, o que também é de se esperar porque ambos são decaimentos, e as duas ondas de choque (do TNT e dos combustíveis) diferem fundamentalmente até chegar ao pico e durante a fase positiva.

Nesse sentido, o grau de confinamento é, de fato, um fator bastante importante, e não apenas para o método multienergia, mas também para o ALOHA. No software, alguns dos dados de entrada visam construir o cenário em que a nuvem explode; são parâmetros que afetam diretamente as possibilidades de confinamento do gás, como a velocidade do vento ou mesmo informações sobre a fonte do vazamento, a vazão e o modo (via tubulação, vazamento de tanque, exposição direta, oleoduto, entre outros) com que o gás escapa. Sendo assim, os valores obtidos também demonstram que o ALOHA não considera apenas a quantidade de gás envolvida, mas também os fatores ambientais tem seu grau de importância, que, pelos resultados, não é tão acentuado quanto no método multienergia.

A fim de ilustrar essa importância, basta considerar graus de confinamento superiores. Com um grau de 7 ou 8, por exemplo, as sobrepressões nos pontos próximos cresceriam a ponto de superar e muito as obtidas com os métodos de equivalência. No ALOHA, essa situação poderia ser considerada ao considerar o vazamento ao invés de ao céu aberto como dentro de uma tubulação

comprimida, o que eleva bastante o grau de congestionamento e também produz resultados bem mais elevados de sobrepressão, e não apenas no Near Field, mas também no Far Field (campo de pontos mais distantes).

Além dessas análises de ordem mais comparativa entre os métodos usados, é possível também avaliar como os valores de sobrepressão obtidos podem causar danos ao entorno. Observa-se, por exemplo, para ambos os casos, com o método de equivalência e com o ALOHA, que os pontos situados a pouco mais de 100 m estão sujeitos a picos maiores do que 0,24 bar e menores do que 0,55 bar. Isso significa que estruturas metálicas ou alvenarias que estejam nesse raio estão seriamente ameaçadas de ruptura, o que pode, inclusive, causar novos acidentes, além dos prejuízos materiais e com vidas humanas.

O potencial destrutivo é mais elevado ainda nos pontos abaixo de 50 m, que para os dois casos, pelo método mais conservador, o de equivalência com o TNT, afirma que picos maiores do que 2 bar podem ocorrer nesses pontos. Para ilustrar melhor os riscos associados, apresenta-se a tabela 8 a seguir:

Sobrepressão (bar)	Dano Esperado
0,20 – 0,27	Destruição das construções de painéis de aço sem armação. Ruptura de tanques de armazenagem de óleo.
0,27	Ruptura de construções industriais “leves” cobertas.
0,34	Destruição de áreas arborizadas. Leves danos em grandes prensas hidráulica (18.200 kg), no interior das construções.
0,34 – 0,48	Destruição quase total das casas.
0,48	Tombamento dos vagões de trens carregados.
0,48 – 0,55	Trinca nos tijolos não reforçados de 20-30 cm de espessura, por tensão de cisalhamento.
0,62	Demolição de vagões fechados de trem.
0,68	Provável destruição total de construções. Partes pesadas de máquinas (3.200 kg) se movem, e ficam muito danificadas. Partes muito pesadas de máquina (5.500 kg) resistem.
1,05 – 2,0	Faixa de 1 a 99% de fatalidades das populações expostas, devido ao efeito direto da explosão.

Tabela 8 – Prováveis efeitos de sobrepressões elevadas (acima de 0,20 bar).

A fim de se obter estimativas mais realistas, calcula-se também os impactos utilizando as funções Probit do modelo de Eisenberg. Avalia-se os impactos nas pessoas, por meio da letalidade por hemorragia pulmonar e percentual de

dano aos tímpanos. Considerando o pior caso de interação da frente de onda com a pessoa (em que a pessoa está em pé, e recebe também a ação da onda refletida por um anteparo), obtém-se os seguintes valores:

Distância ao centro da explosão (m)	Pico de sobrepressão (bar)	Letalidade por hemorragia pulmonar	Dano causado ao tímpano	Efeito esperado pelas tabelas
20	7,13	100%	100%	Provável destruição total de edificações.
30	2,93	100%	100%	Provável destruição total de edificações.
50	1,15	100%	96%	Provável destruição total de edificações.
72	0,55	40%	65%	Capotamento de vagões de trem.
116	0,24	0%	15%	Derrubada de árvores grandes.
150	0,17	0%	5%	Danos com fragmentos.
200	0,13	0%	2%	Demolição parcial de casas.
250	0,10	0%	0%	Entortamento parcial de painéis metálicos.
295	0,07	0%	0%	Quebra de janelas.

Tabela 9 – Prováveis impactos causados pela explosão do caso 1, em função das distâncias.

Distância ao centro da explosão (m)	Pico de sobrepressão (bar)	Letalidade por hemorragia pulmonar	Dano causado ao tímpano	Efeito esperado pelas tabelas
20	9,59	100%	100%	Provável destruição total de edificações.
30	6,61	100%	100%	Provável destruição total de edificações.
50	2,22	100%	100%	Provável destruição total de edificações.
100	0,56	35%	66%	Capotamento de vagões de trem.
150	0,29	0%	24%	Derrubada de árvores grandes.
167	0,24	0%	15%	Colapso de estruturas metálicas.
200	0,18	0%	6%	Quebra de alvenaria simples.
250	0,15	0%	4%	Colapso de cobertas.
418	0,07	0%	0%	Quebra de janelas.

Tabela 10 – Prováveis impactos causados pela explosão do caso 2, em função das distâncias.

5 CONCLUSÕES

Com todo o estudo feito, é possível inferir algumas conclusões. Primeiramente, pode-se afirmar que apesar de haver uma relativa variedade de modelos para quantificar os parâmetros da onda de choque das explosões e estimar os impactos, essa metodologia ainda é muito empírica, ou seja, muito fortemente baseada em experimentos limitados e na análise de consequências de casos reais.

Além disso, a própria aplicação desses métodos muitas vezes requer análises muito subjetivas e de variáveis muito complexas, e que não são facilmente previsíveis. Nesse sentido, os métodos de equivalência com o TNT são mais simples e objetivos, por se basearem apenas nas quantidades de material; entretanto, as condições ambientais (de confinamento e dispersão, por exemplo) podem incrementar significativamente o potencial destrutivo desses eventos. Assim, para esses casos, faz-se necessário utilizar métodos como o multienergia, e também softwares como o ALOHA, para levar em consideração essas importantes variáveis.

Então, uma grande recomendação desse trabalho se faz nesse campo: é essencial, para uma melhor aplicação tanto do método quanto do software, um melhor entendimento a respeito dessas condições de contorno. Compreender bem a influência desses fatores ambientais se faz extremamente importante, primeiro para a escolha do método para quantificação, e, segundo, para que a metodologia seja aplicada de forma mais próxima possível da realidade. Essa é uma das maiores dificuldades da modelagem matemática em si, e não apenas na quantificação dos efeitos de explosões: garantir que o modelo usado para o dimensionamento esteja em alta concordância com a realidade do evento.

Para maximizar essa proximidade do modelo com o fato, faz-se necessário uma análise multicriterial e multidisciplinar; é muito difícil que um único profissional de engenharia seja capaz de identificar e entender bem a complexidade das variáveis ambientais envolvidas. Recomenda-se, pois, que

no gerenciamento de riscos seja montada uma equipe, com especialistas de diversas áreas, e não somente da engenharia. Esse grupo de profissionais também deve conhecer exaustivamente não somente os dados e parâmetros químicos e termodinâmicos do material combustível, mas também, e talvez até principalmente, dependendo dos quantitativos, o ambiente em que o vazamento e a explosão ocorrem. Somente assim é que se pode conceber uma análise mais apurada, tão fidedigna a indesejável situação real quanto possível.

Esse raciocínio funciona bem do ponto de vista genérico, mas ele não é plenamente verdadeiro; a grandeza impulso também tem grande importância na interação entre a onda e a estrutura, de forma que picos de sobrepressão inferiores podem causar efeitos maiores do que os presumidos nas tabelas por conta da duração da fase positiva ser maior, por exemplo. Dessa forma, para compreender melhor os danos que uma estrutura pode sofrer, é necessário modelar ou entender a peça como sofrendo uma ação dinâmica; assim, a análise estrutural é a nível da ciência da dinâmica das estruturas, que apresenta análises mais contundentes e já é uma ciência relativamente consolidada. Uma questão a ser levantada é a de que talvez falte a integração entre a dinâmica estrutural e a quantificação dos efeitos mecânicos de explosões.

Sendo assim, uma excelente sugestão e recomendação para pesquisas futuras são nesse campo: com os parâmetros da onda de choque, tentar estimar os efeitos na estrutura usando a análise dinâmica, e então comparar esses resultados obtidos com aquele previsto pelas tabelas clássicas.

REFERÊNCIAS

ZIMMERMANN, Adriana Thom. **Análise de Riscos de um Vazamento de Gás Natural em um Gasoduto**. Florianópolis: UFSC, 2009

CCPS – Center for Chemical Process Safety. ***Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fire, and BLEVEs***. AIChE – American Institute of Chemical Engineers, 1994.

RÊGO SILVA, José Jeferson. **Efeitos da Explosão na Demolição de Edifícios: algumas considerações**. Recife: UFPE, 2012.

SEITO, Alexandre Itiu (coord.) et al. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil** São Paulo: Projeto Editora, 2008.

AIChE - AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. ***Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosions, Flash Fires, and Bleves***. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. New York, 1994.

TNO - Methods for the Determination of Possible Damage to people and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials, (***the Green Book***), SZW The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment, Committee for the Prevention of Disasters (CPR), Second Edition, 2004.

CASAL, Joaquim. **Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants**. Barcelona, 2008.

KAKOSIMOS, Konstantinos. **Fires, explosions and toxic gas dispersions – effects calculation and risk analysis**. Estados Unidos , 2010.

QUANTIFICAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE - VAPOR CLOUD EXPLOSION

Método da Equivalência com o TNT - HSE

Dados de Entrada:

$T_a := 293\text{K}$ Temperatura Ambiente

$T_b := 231\text{K}$ Temperatura Ebulição

$$\Delta T := T_a - T_b = 62\text{K}$$

$$C_p := 2.41 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Calor Específico}$$

$$L := 410 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{Calor Latente de Vaporização}$$

$$F := 1 - e^{\left(\frac{-C_p \cdot \Delta T}{L} \right)} = 0.305 \quad \text{Flash Fraction}$$

$$H_f := 46.3 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{Calor de Combustão do combustível}$$

$$H_{\text{tnt}} := 4.68 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{Calor de Combustão do TNT}$$

$$\alpha := 0.03 \quad \text{Fator de rendimento}$$

$$m_f := 20000\text{kg} \quad \text{Massa do combustível}$$

$$W_f := 2 \cdot m_f \cdot F = 1.222 \times 10^4 \text{kg} \quad \text{Massa efetiva do combustível}$$

Cálculos e resultados:

$$W_{\text{tnt}} := \alpha \cdot W_f \cdot \frac{H_f}{H_{\text{tnt}}} = 3.626 \times 10^3 \text{ kg} \quad \text{Massa equivalente de TNT}$$

$$r_1 := 295 \text{ m} \quad \text{Distância Real}$$

$$R_1 := \frac{r_1}{\frac{1}{3}} = 19.202 \frac{\text{m}}{\text{kg}^{0.333}} \quad R_{\text{aux1}} := 1 \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}}$$

$$R_{\text{aux2}} := R_1 \cdot R_{\text{aux1}} = 19.202 \quad \text{Distância Escalonada}$$

Forma vetorial do Gráfico 2 - Ábaco da sobrepressão x distância escalonada

Rs :=	1.4	ΔPs :=	6.5
	2		2.625
	3		1.31
	4		0.7
	5		0.47
	6		0.36
	7		0.28
	8		0.22
	9		0.19
	10		0.16
	20		0.06
	30		0.034
	40		0.024
	50		0.018
	60		0.015
	70		0.012
	80		0.01

ΔP := linterp(Rs, ΔPs, Raux2) = 0.068

ΔP = 0.068

QUANTIFICAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE - VAPOR CLOUD EXPLOSION

Método da Equivalência com o TNT - HSE

Dados de Entrada:

$T_a := 423\text{K}$ Temperatura Ambiente

$T_b := 353\text{K}$ Temperatura Ebulição

$\Delta T := T_a - T_b = 70\text{K}$

$C_p := 1.8 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ Calor Específico

$L := 674 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ Calor Latente de Vaporização

$F := 1 - e^{\left(\frac{-C_p \cdot \Delta T}{L} \right)} = 0.171$ Flash Fraction

$H_f := 46.7 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ Calor de Combustão do combustível

$H_{\text{tnt}} := 4.68 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ Calor de Combustão do TNT

$\alpha := 0.03$ Fator de rendimento

$m_f := 100000\text{kg}$ Massa do combustível

$W_f := 2 \cdot m_f \cdot F = 3.41 \times 10^4 \text{kg}$ Massa efetiva do combustível

Cálculos e resultados:

$$W_{tnt} := \alpha \cdot W_f \cdot \frac{H_f}{H_{tnt}} = 1.021 \times 10^4 \text{ kg} \quad \text{Massa equivalente de TNT}$$

$$r1 := 48 \text{ m}$$

Distância Real

$$R1 := \frac{r1}{W_{tnt}^{\frac{1}{3}}} = 2.213 \frac{\text{m}}{\text{kg}^{0.333}} \quad Raux1 := 1 \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}}$$

$$Raux2 := R1 \cdot Raux1 = 2.213$$

Distância Escalonada

Forma vetorial do Gráfico 2 - Ábaco da sobrepressão x distância escalonada

	1.4		6.5
	2		2.625
	3		1.31
	4		0.7
	5		0.47
	6		0.36
	7		0.28
	8		0.22
Rs :=	9	ΔPs :=	0.19
	10		0.16
	20		0.06
	30		0.034
	40		0.024
	50		0.018
	60		0.015
	70		0.012
	80		0.01

$$\Delta P := \text{linterp}(Rs, \Delta Ps, Raux2) = 2.345$$

$$\Delta P = 2.345$$

QUANTIFICAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE - VAPOR CLOUD EXPLOSION

Método Multienergia

Dados de Entrada:

$$N := 2$$

Número de Fontes potenciais

$$P_o := 101325 \text{ Pa}$$

Pressão ambiente

$$H_f := 46.3 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Calor de Combustão do combustível

$$m_f := 20000 \text{ kg}$$

Massa total de combustível

$$E_t := m_f \cdot H_f = 9.26 \times 10^{11} \text{ J}$$

Energia total da nuvem

$$H_c := 3.0 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Calor de combustão

Cálculos e resultados:

$$Co := 340 \frac{m}{s}$$

$$r := 120m$$

$$R := \frac{r}{\left(\frac{Et}{Po}\right)^{\frac{1}{3}}} = 0.574$$

$$\Delta ps := 0.12$$

$$tp := 0.47 = 0.47$$

$$\Delta P := \Delta ps \cdot Po = 1.216 \times 10^4 Pa$$

$$t := tp \cdot \frac{\left(\frac{Et}{Po}\right)^{\frac{1}{3}}}{Co} = 0.289s$$

QUANTIFICAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE - VAPOR CLOUD EXPLOSION

Método Multienergia

Dados de Entrada:

$$N := 2$$

Número de Fontes potenciais

$$P_o := 101325 \text{ Pa}$$

Pressão ambiente

$$H_f := 46.7 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Calor de Combustão do combustível

$$m_f := 100000 \text{ kg}$$

Massa total de combustível

$$E_t := m_f \cdot H_f = 4.67 \times 10^{12} \text{ J}$$

Energia total da nuvem

$$H_c := 3.0 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Calor de combustão

Cálculos e resultados:

$$Co := 340 \frac{m}{s}$$

$$r := 600m$$

$$R := \frac{r}{\left(\frac{Et}{Po}\right)^{\frac{1}{3}}} = 1.673$$

$$\Delta ps := 0.12$$

$$tp := 0.47 = 0.47$$

$$\Delta P := \Delta ps \cdot Po = 1.216 \times 10^4 Pa$$

$$t := tp \cdot \frac{\left(\frac{Et}{Po}\right)^{\frac{1}{3}}}{Co} = 0.496s$$

Overpressure (Blast Force) Threat Zone

ALOHA® 5.4.5



Time: October 12, 2014 1629 hours PDT (user specified)

Chemical Name: HYDROGEN

Wind: 10 miles/hour from 360° true at 10 meters

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion

Type of Ignition: ignited by spark or flame

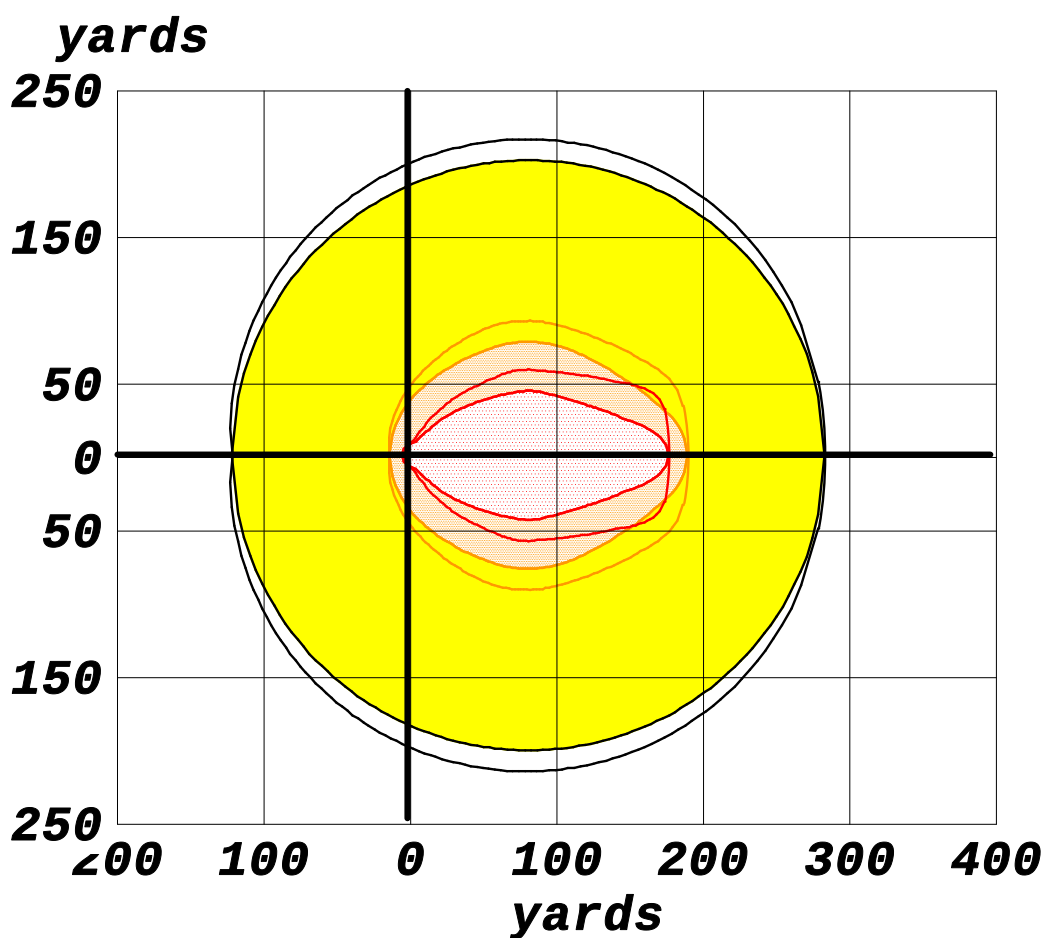
Level of Congestion: congested

Model Run: Gaussian

Red : 177 yards --- (8.0 psi = destruction of buildings)

Orange: 190 yards --- (3.5 psi = serious injury likely)

Yellow: 283 yards --- (1.0 psi = shatters glass)



greater than 8.0 psi (destruction of buildings)



greater than 3.5 psi (serious injury likely)



greater than 1.0 psi (shatters glass)



wind direction confidence lines

**SITE DATA:****Location: ANAHEIM, CALIFORNIA****Building Air Exchanges Per Hour: 0.56 (sheltered single storied)****Time: October 12, 2014 1629 hours PDT (user specified)****CHEMICAL DATA:****Chemical Name: HYDROGEN****Molecular Weight: 2.02 g/mol****PAC-1: 65000 ppm PAC-2: 230000 ppm PAC-3: 400000 ppm****LEL: 40000 ppm UEL: 750000 ppm****Ambient Boiling Point: -423.0° F****Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm****Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%****ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)****Wind: 10 miles/hour from 360° true at 10 meters****Ground Roughness: open country****Cloud Cover: 10 tenths****Air Temperature: 70° F****Stability Class: D****No Inversion Height****Relative Humidity: 70%****SOURCE STRENGTH:****Leak from hole in vertical cylindrical tank****Flammable chemical escaping from tank (not burning)****Tank Diameter: 2 meters****Tank Length: 3 meters****Tank Volume: 9.42 cubic meters****Tank contains gas only****Internal Temperature: 78° C****Chemical Mass in Tank: 121 kilograms****Circular Opening Diameter: 40.64 centimeters****Release Duration: 1 minute****Max Average Sustained Release Rate: 4.39 pounds/sec****(averaged over a minute or more)****Total Amount Released: 263 pounds****THREAT ZONE:****Threat Modeled: Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion****Type of Ignition: ignited by spark or flame****Level of Congestion: congested****Model Run: Gaussian****Red : 177 yards --- (8.0 psi = destruction of buildings)****Orange: 190 yards --- (3.5 psi = serious injury likely)****Yellow: 283 yards --- (1.0 psi = shatters glass)**

Overpressure (Blast Force) Threat Zone

ALOHA® 5.4.5



Time: October 12, 2014 1629 hours PDT (user specified)

Chemical Name: N-DECANE

Wind: 10 miles/hour from 360° true at 10 meters

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion

Type of Ignition: ignited by spark or flame

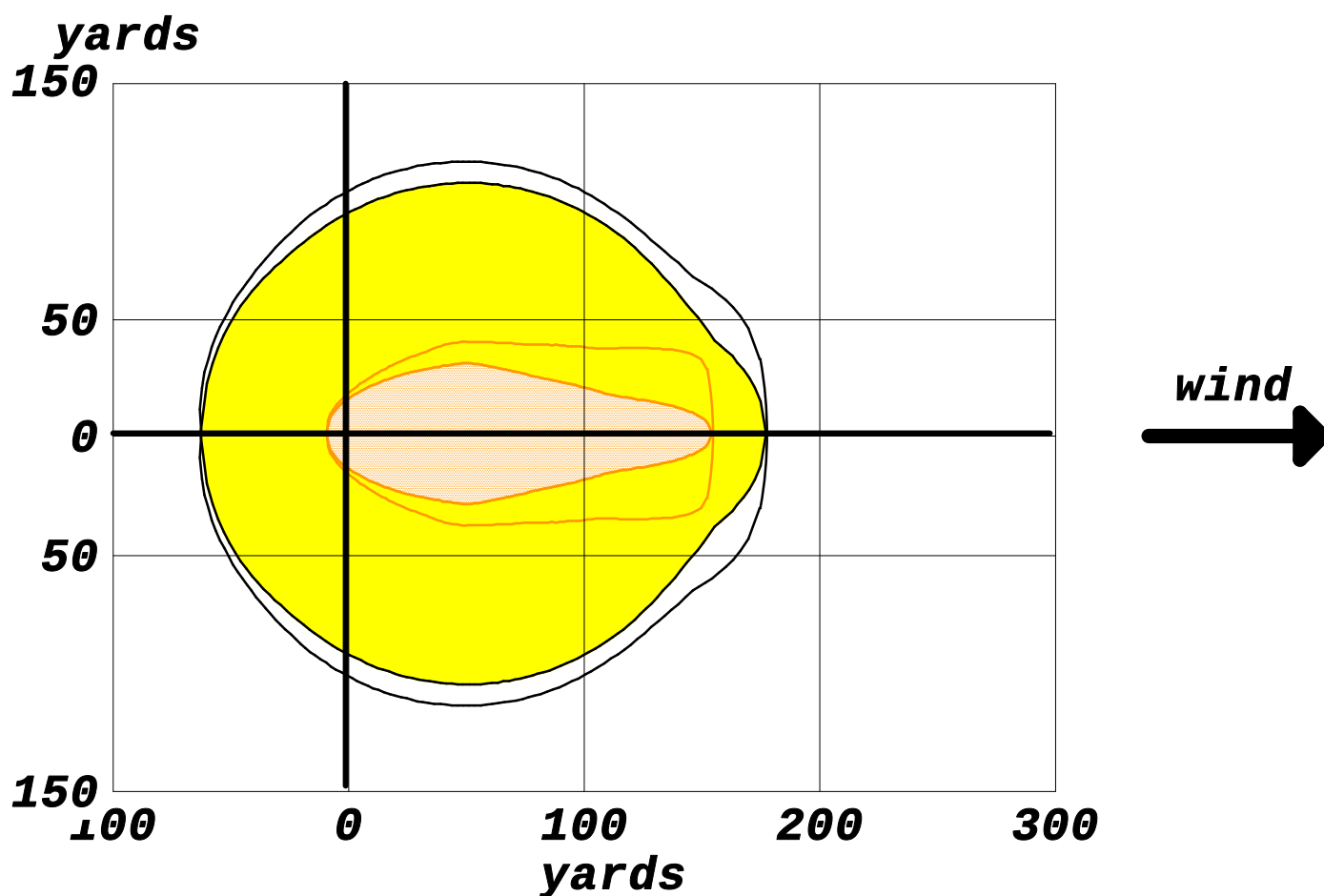
Level of Congestion: congested

Model Run: Heavy Gas

Red : LOC was never exceeded --- (8.0 psi = destruction of buildings)

Orange: 155 yards --- (3.5 psi = serious injury likely)

Yellow: 178 yards --- (1.0 psi = shatters glass)



greater than 8.0 psi (destruction of buildings)



greater than 3.5 psi (serious injury likely)



greater than 1.0 psi (shatters glass)



wind direction confidence lines

**SITE DATA:****Location: ANAHEIM, CALIFORNIA****Building Air Exchanges Per Hour: 0.56 (sheltered single storied)****Time: October 12, 2014 1629 hours PDT (user specified)****CHEMICAL DATA:****Chemical Name: N-DECANE****Molecular Weight: 142.28 g/mol****PAC-1: 1.9 ppm PAC-2: 20 ppm****PAC-3: 440 ppm****LEL: 7500 ppm UEL: 54000 ppm****Ambient Boiling Point: 345.2° F****Vapor Pressure at Ambient Temperature: 0.0014 atm****Ambient Saturation Concentration: 1,365 ppm or 0.14%****ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)****Wind: 10 miles/hour from 360° true at 10 meters****Ground Roughness: open country****Cloud Cover: 10 tenths****Air Temperature: 70° F****Stability Class: D****No Inversion Height****Relative Humidity: 70%****SOURCE STRENGTH:****Leak from hole in vertical cylindrical tank****Flammable chemical escaping from tank (not burning)****Tank Diameter: 2 meters****Tank Length: 3 meters****Tank Volume: 9.42 cubic meters****Tank contains gas only****Internal Temperature: 347° C****Chemical Mass in Tank: 999 kilograms****Circular Opening Diameter: 20.32 centimeters****Release Duration: 1 minute****Max Average Sustained Release Rate: 35.7 pounds/sec****(averaged over a minute or more)****Total Amount Released: 2,144 pounds****THREAT ZONE:****Threat Modeled: Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion****Type of Ignition: ignited by spark or flame****Level of Congestion: congested****Model Run: Heavy Gas****Red : LOC was never exceeded --- (8.0 psi = destruction of buildings)****Orange: 155 yards --- (3.5 psi = serious injury likely)****Yellow: 178 yards --- (1.0 psi = shatters glass)**