



João Pedro Martins Santos Jorge

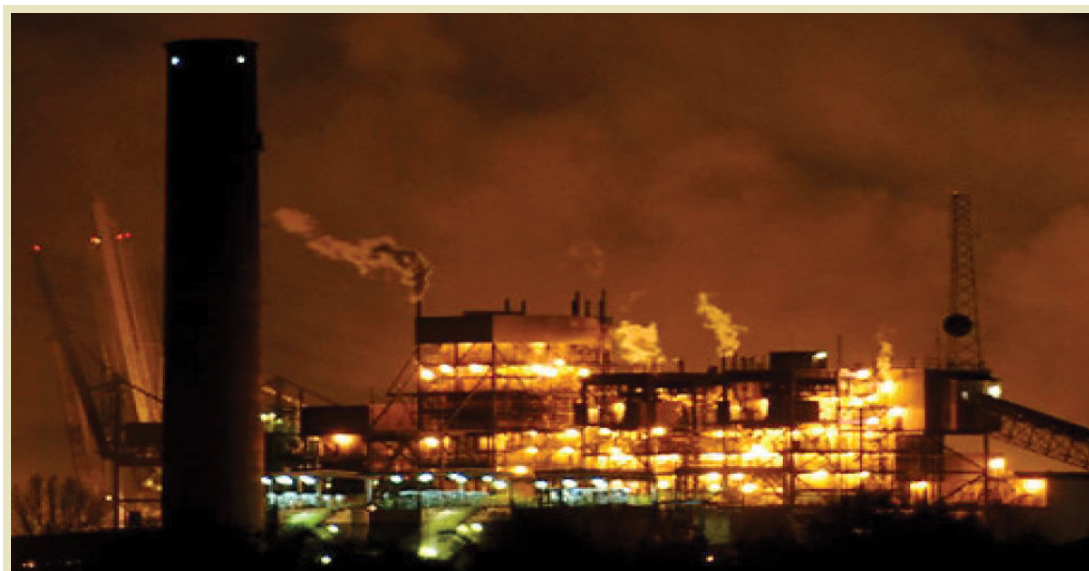
AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO EFFECTS 9 PARA QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DE EXPLOSÃO EM CENÁRIOS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente

Fevereiro, 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



João Pedro Martins Santos Jorge

AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO EFFECTS 9 PARA QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DE EXPLOSÃO EM CENÁRIOS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente

Fevereiro, 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação das potencialidades do programa de simulação EFFECTS 9[®] para quantificação dos efeitos de explosão em cenários industriais

Dissertação a apresentar para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

João Pedro Martins Santos Jorge

Orientador

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Vogais	Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Orientador	Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor José Carlos Miranda Góis, pelo apoio, pelos conselhos construtivos e encorajamento que contribuíram para a elaboração da dissertação.

Ao Doutor Victor Van Swinderen do TNO, Holanda pela cedência de uma licença educacional do programa EFFECTS 9®.

Aos meus pais pelo incentivo que me deram, e continuam a dar, pela ajuda e motivação em toda a minha formação.

Aos meus amigos de Coimbra pela ajuda e companheirismo, com eles a vida académica tornou-se muito mais marcante.

À Joana pelo apoio, inspiração, paciência e ajuda.

A todos, o meu muito obrigado!

Resumo

Este trabalho procura dar relevância aos programas de simulação como uma importante ferramenta de estudo e análise de risco de acidentes industriais, envolvendo materiais perigosos. São descritos alguns acidentes históricos com matérias perigosas e analisada a importância da avaliação de riscos para controlar e mitigar os efeitos de tipo de acidentes, considerados graves em muitos casos. São discutidos alguns dos regulamentos de prevenção relativos ao fabrico, armazenagem e transporte de matérias perigosas, bem como a prevenção e proteção dos trabalhadores em locais suscetíveis de formação de atmosferas explosivas. Os programas de simulação são apresentados como uma ferramenta bastante útil para ajudar a desenvolver medidas de prevenção e mitigação a possíveis cenários de acidente, sendo apresentados alguns programas de simulação e evidenciadas algumas das suas potencialidades. É usado o programa EFFECTS 9® aplicado a três modelos de simulação: Multi-Energy, TNT Equivalency e BLEVE, para prever os efeitos da explosão de propano. De modo a perceber a fiabilidade do programa nos cenários estudados é efetuada a comparação entre os resultados do cálculo manual e do cálculo automático através do EFFECTS 9®. Para os três casos estudados é efetuada uma análise de sensibilidade à mudança de valor de algumas variáveis.

Palavras-chave: Materiais perigosos, Acidentes industriais, Risco, *Software*, Simulação, Explosão.

Abstract

This work explore the relevance of numerical codes as an important tool to risk analysis of industrial accidents connected to hazardous materials. Some historical accidents with hazardous materials are described to highlight the importance of risk assessment to prevent and mitigate the effects of such accidents. It is discussed some of the prevention regulations relating to the manufacture, storage and transport of hazardous materials, as well as prevention and protection of workers in areas susceptible to developing explosive atmospheres. The numerical codes are described as a useful tool to help the developing of prevention and mitigation measures to react potential accident scenarios and are characterized according their application. The numerical code EFFECTS 9® is tested for three simulation models: Multi-Energy, TNT Equivalency and BLEVE, to predict the damage caused by the explosion of propane gas. In order to appreciate the reliability of numerical code EFFECTS 9® for the studied scenarios is performed a comparison with the analytical results. For the three studied scenarios is performed a sensitivity analysis to control the data variation of specific variables.

Keywords Hazardous materials, Industrial accidents, Risk, Software, Simulation, Explosion

Índice

Índice	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tabelas	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	5
2. ACIDENTES E RELEVÂNCIA DA ANÁLISE DE RISCOS NO CONTROLO E MITIGAÇÃO DE DANOS PROVOCADOS POR MATÉRIAS PERIGOSAS	7
2.1. Efeitos dos acidentes com matérias perigosas	7
2.1.1. Acidentes industriais graves: classificação e caracterização	8
2.1.2. Acidentes industriais históricos	10
2.2. Importância da análise de riscos para a mitigação dos acidentes com matérias perigosas	15
2.2.1. Principal regulamentação europeia e nacional sobre as medidas de prevenção com matérias perigosas	19
2.2.2. Programas de simulação de explosões e dispersão de gases: potencialidades e fraquezas	26
2.3. Principais programas de simulação de fenómenos com materiais perigosos e suas aplicações	28
3. EXPLORAÇÃO DO PROGRAMA EFFECTS 9®	32
3.1. Breve introdução sobre a escolha de cenários e opções	32
3.2. Cenários e modelos explorados	38
3.2.1. Método Multi-Energy	38
3.2.2. Método TNT Equivalency	44
3.2.3. BLEVE Static Model	48
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	55
5. CONCLUSÕES	59
5.1. TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO A	67
ANEXO B	69
ANEXO C	70
ANEXO D	71
ANEXO E	72
ANEXO F	73

ANEXO G	74
APÊNDICE A	75

Índice de figuras

Figura 2.1 - Degradação dos depósitos após explosão.	11
Figura 2.2 - Libertação das matérias após acidente.	12
Figura 2.3 – Restos da antiga fábrica abandonada da Union Carbide.	12
Figura 2.4 - Fotografia aérea sobre uma das zonas de impacto da explosão.	13
Figura 2.5 – Destruição da fábrica após a explosão.	14
Figura 3.1 - Interface do <i>software</i> EFFECTS 9® (TNO, 2012).	34
Figura 3.2 - Diferentes possibilidades para unidades.	35
Figura 3.3 - Comparação dos modelos.	36
Figura 3.4 - Propriedades constantes butano.	36
Figura 3.5 - Viscosidade do líquido em função da temperatura.	37
Figura 3.6 - Pressão de vapor em função da temperatura.	37
Figura 3.7 – Nuvem de vapor com duas explosões em regiões confinadas.	39
Figura 3.8 - Distâncias em relação à fire ball (“Yellow Book”, 2005).	49

Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Resumo de programas e funcionalidades (adaptado de Reniers, 2006)	4
Tabela 2.1 - Tipologia dos acidentes industriais graves (Kirchsteiger, 1997).	8
Tabela 2.2 – Armazenamento de matérias perigosas em instalações industriais. (Adaptado do Portal da Construção – Guia técnico).	17
Tabela 3.1 - Dados para aplicação do modelo Multi-Energy.	40
Tabela 3.2 - Resultados obtidos e exportados, do programa Effects 9®, referentes ao modelo Multi-Energy.	43
Tabela 3.3 - Dados para aplicação do modelo TNT Equivalency.	45
Tabela 3.4 - Resultados obtidos e exportados, do programa Effects 9®, referentes ao modelo TNT Equivalency.	46
Tabela 3.5 - Dados para aplicação do modelo BLEVE Static Model.	48
Tabela 3.6 - Resultados obtidos e exportados, do programa Effects 9®, referentes ao modelo BLEVE.	54
Tabela 4.1 - Comparação de resultados para o modelo Multi-Energy.	55
Tabela 4.2 - Comparação de resultados para o modelo TNT Equivalency.	56
Tabela 4.3 - Comparação de resultados para o modelo BLEVE Static.	56

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nas atividades industriais é muito frequente o uso de matérias perigosas, com risco de incêndio, explosão e/ou libertação de gases tóxicos. Esse risco está presente nas diferentes etapas a que essas substâncias estão sujeitas, nomeadamente trasfega, armazenagem, fabrico, teste, transporte. Em todas estas etapas devem ser identificados os riscos e adotadas as medidas de prevenção e mitigação adequadas, onde se inclui nomeadamente a elaboração de um plano de emergência.

Não são apenas nas atividades industriais que se deve ter precauções com o uso de matérias perigosas. Muitas vezes em habitações são manuseados e armazenados materiais perigosos, tais como gases e líquidos combustíveis armazenados em depósitos (usados para aquecimento ou para abastecer possíveis máquinas de jardinagem), que podem originar acidentes graves quando não são tidas as devidas precauções e adotadas as distâncias de segurança recomendadas.

Em caso de acidente com materiais perigosos, para além dos efeitos que estes podem causar nos funcionários das empresas, ou nas pessoas que moram na habitação afetada, nos casos domésticos, muitas vezes provocam danos na população, nas estruturas na vizinhança e, também no meio-ambiente. Na avaliação dos riscos envolvendo este tipo de materiais existem questões importantes que devem ser tidas em conta, como o nível de segurança que deve ser adotado, que garantias se podem ter quanto à estabilidade química das substâncias, quais os processos industriais que requerem maior controlo, quais as condições de segurança das instalações. Para obter respostas a essas questões deve-se seguir um processo de análise de riscos.

Toda atividade ou processo em que seja utilizado uma matéria perigosa deve-se submeter a regras específicas aquando a sua utilização e armazenagem. Neste sentido, o governo à

semelhança de outros países, em particular na União Europeia (EU), possui um diverso conjunto de medidas legislativas que abrangem todos os meios envolventes que usam/transportam materiais perigosos, das quais se referem alguns decretos-lei:

- O decreto-lei n.º 254/2007 estabelece o regime de prevenção para acidentes graves que envolvam matérias perigosas, de forma a limitar as consequências destes para o homem e para o ambiente. Este decreto-lei destina-se a todos os estabelecimentos que possuam matérias perigosas em quantidades iguais ou superiores às permitidas (Anexo I do decreto-lei n.º 254/2007).
- O decreto-lei n.º 139/2002 apresenta o regulamento de segurança dos estabelecimentos de produção e armazenamento de produtos explosivos. Este regulamento define as normas e os procedimentos especiais de segurança que os estabelecimentos ligados à produção de materiais explosivos devem ter quanto à implantação, organização e funcionamento destes.
- O decreto-lei n.º 41-A/2010 é o regulamento nacional utilizado no que diz respeito ao transporte de mercadorias perigosas por vias terrestres. O decreto encontra-se dividido, com regras específicas para o transporte rodoviário com o Regulamento do Transporte de Mercadorias Perigosas por Estrada, no qual está incluído o Acordo Europeu Relativo ao Transporte Internacional de Mercadorias Perigosas por Estrada (ADR), e com regras específicas para o transporte ferroviário com o Regulamento do Transporte de Mercadorias Perigosas por Caminho-de-ferro, correspondendo as mesmas disposições do Regulamento Relativo ao Transporte Ferroviário Internacional de Mercadorias Perigosas (RID).
- O decreto-lei n.º 236/2003 de 30 de setembro transpõe para a ordem jurídica nacional a diretiva n.º 1999/92/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa às prescrições mínimas destinadas a promover a melhoria da proteção da segurança e da saúde dos trabalhadores suscetíveis de serem expostos a riscos derivados de atmosferas explosivas. Na prevenção de explosões são essenciais medidas de carácter técnico e organizativas. Essas medidas constituem uma responsabilidade do empregador, que deve evitar a formação de atmosferas explosivas ou, se isso for inviável, deve evitar a sua deflagração, bem como a propagação de eventuais explosões. As áreas onde se possam formar atmosferas

explosivas devem ser classificadas em função da frequência e da duração das mesmas, constituindo essa classificação um critério de seleção dos equipamentos e dos sistemas que assegurem um nível de proteção adequado.

No cumprimento da legislação e outras recomendações técnicas de segurança deve-se atuar de uma forma preventiva, tentando calcular os riscos e perceber quais os danos causados em caso de acidente na utilização destes materiais. Para isso, é importante o uso da experimentação e simulação por forma a caracterizar a reatividade dos materiais em diversos cenários propícios a acidente, e deste modo quantificar os riscos e danos que podem ser causados antes de um possível acidente.

Para este efeito, o uso da simulação com *software* apropriado é muitas vezes vantajoso quando comparado à experimentação, pois os custos laboratoriais, bem como as áreas de segurança exigidas e o diverso equipamento/material necessário são por vezes elevados e difíceis de suportar, existindo também um risco da experimentação laboratorial poder produzir acidentes.

Além dos custos mais reduzidos e maior segurança, os programas de simulação são capazes de combinar modelos, e tornar o cálculo mais rápido, o que manualmente seria complexo e moroso. Permitem estimar, por exemplo, possíveis danos, distâncias de segurança, contribuindo para o desenvolvimento de planos de emergência para diferentes cenários de acidente.

Há uma vasta oferta de programas para simulação de cenários de acidentes com matérias perigosas, tendo a maioria um custo associado para a sua aquisição ou utilização temporária. Neste domínio é possível obter gratuitamente alguns programas de simulação, mas as suas funcionalidades ficam muito aquém quando comparados com programas que oferecem um “output” gráfico sofisticado, que dispõem de cenários variados e de uma base de dados com propriedades dos materiais. Na Tabela 1.1 pode-se ver algumas das funcionalidades dos programas comercializados.

Tabela 1.1 - Resumo de programas e funcionalidades (adaptado de Reniers, 2006)

	Incêndio	Explosão	Dispersão	Toxicidade	Ambiental	Plataforma SIG disponível	Decisões de localização	Decisões de planeamento e resposta de emergência	Cálculo de zonas de efeito	Cálculo em tempo real
1	•	•	•	•	•	•	•		•	•
2	•	•	•	•		•		•	•	
3	•	•					•	•		
4	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
5	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
6	•	•					•	•	•	•
7	•	•	•	•	•		•	•	•	
8	•	•	•	•	•		•	•	•	•

1=AIDRAM-CARGO; 2=ARIPAR; 3=BIS; 4=BREEZE Hazard Professional; 5=CHARM; 6=ExTool; 7=SAVE; 8=SEVEX View.

Funcionando os programas de simulação por meio de modelos matemáticos, utilizados para modelação de um determinado cenário de acidente, é através de cálculos que estes simulam o modelo pretendido conforme os dados introduzidos. Quando se utiliza este género de programas é importante que o utilizador tenha conhecimentos na área e que consiga identificar os modelos/cálculos utilizados pois só assim conseguirá compreender o funcionamento do programa e conseguir a melhor análise dos resultados (Souza, 2011). Para além da compreensão quanto ao funcionamento dos programas, uma outra dificuldade que o utilizador poderá ter deve-se à complexidade exigida quanto ao estudo do acidente em si, ou seja, dados sobre a evolução do cenário de acidente que se pretende simular (desde a fonte de ignição, quantidades de matéria perigosa, forma de ignição, etc.) como também a complexidade quanto à entrada desses dados, isto é, analisar em que unidades estão os dados e perceber se o programa os aceita (Bellasio e Blanconi, 2003). Para estes dois autores, muitos dos programas de simulação não possuem as interfaces de ajuda necessárias.

Neste sentido, o utilizador depara-se com um conjunto diverso de situações com as quais tem de lidar primeiramente antes da seleção do programa de simulação que pretende. Essa escolha deve assentar no conhecimento dos modelos matemáticos que o programa utiliza e se o utilizador possui toda a informação base sobre o(s) acidente(s) que pretende estudar. A

esses dados junta-se a informação sobre as capacidades que os vários programas têm a oferecer. É importante nesta fase que o utilizador relacione os modelos do programa com o tipo de acidente que vai estudar, com as bases de dados que os programas possuem, qual o esforço financeiro a realizar para adquirir o programa e que esforço terá de fazer para conseguir dominar e compreender os algoritmos em que o programa se baseia. Nesta perspetiva, revela-se importante adquirir conhecimentos sobre os modelos matemáticos e o funcionamento destes pois é a partir dessa compreensão que será possível ter uma sensibilidade adequada aos resultados que o programa fornece.

O programa deve ser adaptado ao tipo de cenário que se pretende estudar (Bellasio e Blanconi, 2003). Grande parte dos programas de simulação existentes, como se pode comprovar pela Tabela 1.1, possuem as principais funcionalidades em relação ao tipo de cenário: incêndio, explosão; dispersão; toxicidade; no entanto, nem todos têm a funcionalidade de cálculo em tempo real, como também não fornecem informação sobre medidas de proteção/mitigação e planos de emergência, ou um sistema SIG integrado. Existem no mercado ofertas de programas mais completos e com diversas funcionalidades, o importante será analisar e selecionar aquele que tenha todas as funcionalidades que se pretende. Não sendo possível deve ser feita uma seleção em função do maior número de funcionalidades essenciais.

1.2. Objetivos

O presente estudo visa caracterizar os efeitos associados a possíveis acidentes com materiais perigosos, com destaque para os mais comuns entre os acidentes industriais.

Em concreto pretende-se:

- Através da simulação de alguns cenários perceber a importância e validade dos resultados da simulação, para quantificar os possíveis danos e estudar formas de controlo e de mitigação desses danos.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Identificar os acidentes industriais mais relevantes que ocorreram com materiais perigosos;
- Perceber que tipo de legislação existe, tanto a nível nacional como internacional, de prevenção dos acidentes e quais as medidas de segurança de bens, pessoas e ambiente que são recomendadas;
- Identificar alguns programas de simulação comercializados e caracterizá-los em termos de potencialidades, fraquezas, complexidade na introdução de dados e exploração de resultados;
- Analisar o potencial do *software* EFFECTS 9® para simular alguns cenários de acidente provocados por matérias perigosas;
- Compreender toda a metodologia dos modelos de simulação através do seu cálculo manual.

2. ACIDENTES E RELEVÂNCIA DA ANÁLISE DE RISCOS NO CONTROLO E MITIGAÇÃO DE DANOS PROVOCADOS POR MATÉRIAS PERIGOSAS

2.1. Efeitos dos acidentes com matérias perigosas

Quando se manuseiam matérias perigosas sabe-se que há riscos inerentes, sejam eles nas etapas de armazenamento ou no transporte. É importante definir o que é um risco para se poder adotar as medidas necessárias de prevenção e controlo. Para Lohani et al (1997), o risco é entendido como a probabilidade de um acidente ocorrer num determinado período de tempo. A mesma definição é utilizada em diversas normas e em decretos de lei, como por exemplo a Norma Europeia EN 1473:1997 e o decreto-lei nº164/2001, nos quais o risco é entendido como a probabilidade de, num período de tempo ou de circunstância, um determinado evento específico ocorrer. O risco é, igualmente, caracterizado pela referência aos eventos e às potenciais consequências destes, isto é, o risco é também a frequência que um evento pode ocorrer e causar danos (ISO Guide 73:2009).

É igualmente importante clarificar a noção de acidente grave para que haja uma definição clara e concreta sobre quais as principais medidas de prevenção e controlo desses acidentes. De acordo com a Lei de bases da proteção civil (Lei n.º 113/91), um acidente grave é um acontecimento ocorrido de forma repentina e imprevisível, provocado por ação humana ou de natureza, num determinado espaço de tempo e de circunstância podendo originar danos em pessoas, bens ou no ambiente. O decreto-lei n.º164/2001 refere ainda que um acidente grave pode-se definir como um acontecimento não controlado com matérias perigosas tal como incêndio ou explosão, do qual resultam danos na saúde humana e no meio ambiente.

2.1.1. Acidentes industriais graves: classificação e caracterização

Como já foi referido, os acidentes industriais graves podem produzir diversos danos, sejam eles provocados por explosões, incêndios ou libertação de nuvens tóxicas, resultantes de matérias perigosas (tóxicas, inflamáveis ou explosivas). Segundo Kirchsteiger (1997), os acidentes graves podem ser classificados em função da atividade, tipo de substâncias envolvidas e tipo de acidente (Tabela 2.1). Este tipo de classificação pode ser aplicada em acidentes nas instalações fixas ou em acidentes no transporte (Khan e Abbasi, 1999). Os acidentes ocorridos em instalações fixas incluem todos aqueles que acontecem durante o processamento e armazenamento de materiais perigosos e os acidentes no transporte englobam os processos de transporte (excluindo o transporte por condutas) e trasfega. Estes autores compilaram 3222 acidentes, entre 1976 e 1995, baseados em vários artigos relacionados com o transporte/armazenamento/processamento de materiais perigosos, tendo 54% dos acidentes ocorrido em instalações fixas, 41% durante o transporte e 5% em acidentes diversos (Khan e Abbasi, 1999, p.366).

Tabela 2.1 - Tipologia dos acidentes industriais graves (Kirchsteiger, 1997).

Acidente industrial grave		
Atividade	Substâncias	Resulta
Armazenamento	Tóxicas	Fugas Tóxicas
Processo	Inflamáveis	Incêndios
Transporte	Explosivas	Explosões

De uma forma geral os acidentes graves com matérias perigosas em instalações industriais, estão associados a três tipos de efeitos: tóxicos, térmicos e sobrepressão.

- **Efeitos térmicos**

Os efeitos térmicos resultam do aumento da temperatura provocada pela libertação de energia, associada à combustão de uma substância inflamável. Essa transmissão de energia pode-se fazer por radiação, convecção ou condução. A magnitude dos efeitos térmicos é

medida indiretamente pelo grau das queimaduras produzidas (internas ou externas, de forma parcial ou total na pessoa que foi exposta) (PPRT, 2007).

Exemplo: Acidente/Explosão de um comboio de mercadorias perigosas (petróleo) em Julho de 2013, no Canadá.

- **Efeitos tóxicos**

Os efeitos tóxicos podem causar danos à saúde humana através da inalação, da ingestão ou de absorção cutânea, mesmo em pequenas quantidades. A libertação de substâncias tóxicas pode resultar de uma fuga de matéria tóxica ou dos produtos da combustão de incêndio ou da matéria volátil de uma reação de decomposição térmica. A inalação é a forma mais rápida e comum de entrada de substâncias tóxicas no organismo e pode atingir tanto os trabalhadores no local como a população envolvente. Por via cutânea ou ingestão de substâncias tóxicas, o risco centra-se diretamente na população que utiliza essas substâncias nos processos industriais (Araújo, 2005).

Exemplo: Acidente numa fábrica de pesticidas em 1984, na cidade de Bhopal, onde foram libertados cerca de 40 toneladas de gases tóxicos.

- **Efeitos de sobrepressão**

Os efeitos de sobrepressão são consequência de uma explosão, manifestando-se pela propagação a alta velocidade na atmosfera de uma onda de pressão. A pressão é calculada considerando a relação da força por unidade de área, suscetível de induzir forças de flexão ou corte nas estruturas e, eventualmente, no ser humano. A onda de pressão pode também originar propagação de projéteis (PPRT, 2007). A geração de sobrepressão pode ser de diversas origens, como por exemplo, libertação de energia por consequência de uma explosão de um reservatório sob pressão, por decomposição de substâncias explosivas, por combustão de gases, vapores ou poeiras, entre outros.

Exemplo: Explosão (seguida de incêndio) numa refinaria de açúcar nos Estados Unidos da América, em 2008. A explosão deveu-se à acumulação de poeiras de açúcar no edifício de

embalamento, devido à falta de manutenção dos equipamentos e de limpeza do ambiente fabril.

2.1.2. Acidentes industriais históricos

Ao longo dos últimos 50 anos, a história tem sido marcada por graves acidentes industriais. Alguns foram determinantes para a regulamentação relacionada com a utilização de materiais perigosos em atividades industriais. Apesar da conotação negativa que trouxeram para o ambiente, para as populações e para os espaços, foi depois desses acontecimentos que surgiram projetos de investigação, o reforço no desenvolvimento de novos materiais mais seguros e a automatização de algumas tarefas consideradas de maior risco. De seguida, serão apresentados cinco dos acidentes industriais mais graves da história, todos eles ocorridos em situações diferentes:

1974, 1 de Junho – Acidente em Flixborough, uma pequena cidade no norte de Inglaterra, numa fábrica de produção de caprolactama. Uma das tubagens sofreu uma rutura tendo levado a um vazamento de cerca de 30 a 50 toneladas de ciclohexano a alta temperatura. Com o vazamento, o químico evaporou-se, originando uma nuvem de vapor não confinada que explodiu pouco depois. A explosão fez-se sentir num raio de 13 km da fábrica, tendo esta ficado totalmente destruída e as zonas próximas com danos materiais (Figura 2.1). Causou a morte a 28 pessoas e ferimentos graves a mais de 100. A causa deste acidente deveu-se à substituição temporária de um dos reatores, levado para reparação, pela instalação de uma tubagem provisória a ligar o circuito. Não foram cumpridas todas as regras de segurança, nem selecionado o material apropriado. A falta de eficácia na instalação e controlo da tubagem levou, após três meses, a uma rutura da mesma. Devido às elevadas pressões, temperaturas e à presença de nitratos a tubagem cedeu. Na altura do vazamento do químico não estava disponível na fábrica qualquer engenheiro responsável e a situação não foi controlada de imediato, conduzindo à explosão (Pascon, 1999).



Figura 2.1 - Degradação dos depósitos após explosão.

Fonte: www.erris.org/images/pics/majaccidents/flixborough.html
(consultado a 3 de Janeiro de 2015).

1976, 10 Julho – Acidente em Meda, uma cidade a norte de Milão (Itália), numa fábrica de químicos. O reator no qual era produzida a substância triclorofenol (utilizado na preparação de herbicidas e de alguns antibacterianos) libertou uma nuvem tóxica após uma reação exotérmica (Figura 2.2). A nuvem expandiu-se por mais quatro cidades italianas. A direção dos ventos naquele dia fez com que a cidade de Seveso fosse a mais atingida. A fábrica teria conhecimento da falta de segurança na produção de triclorofenol devido à utilização de dioxina numa das fases de produção, contudo havia pouca informação sobre os efeitos desta toxina, havendo pouca certeza sobre os efeitos nocivos para a saúde humana. Após 7 dias, a empresa responsável pela fábrica pronunciou-se e anunciou que teria havido uma fuga da dioxina e que as zonas em redor da fábrica deveriam ser evacuadas de imediato. A 24 de Julho deram início às evacuações e mais de 700 pessoas das localidades de Meda e Seveso tiveram de deixar as suas casas. Devido à contaminação do meio ambiente muitos animais morreram e outros foram sacrificados de forma a evitar o seu consumo. Apesar de não haver conhecimentos de mortes diretamente relacionadas com a toxina, acredita-se que esta terá tido um efeito nocivo na saúde pública. Muitos dos habitantes revelaram problemas a nível dermatológico (Centemeri, 2010).



Figura 2.2 - Libertação das matérias após acidente.

Fonte: www.etp.pt/pt/page/riscosambientais (consultado a 3 de Janeiro de 2015).

1984, 3 Dezembro – Acidente numa fábrica de pesticidas em Bhopal (Índia), onde cerca de 40 toneladas de gases tóxicos, isocianato e o hidrocianeto, foram libertados, de um tanque durante uma operação de rotina (Figura 2.3). Os meios de segurança e prevenção não foram acionados corretamente e a sirene de aviso para a população estava desligada. Estima-se que 3 dias após a exposição aos gases cerca de 8 mil pessoas já tinham perdido a vida. Os médicos não tiveram condições para tratar adequadamente todos os habitantes expostos. Os gases libertados provocaram queimaduras no rosto e nos pulmões, prejudicaram todo o sistema humano ao entrarem na corrente sanguínea. A noite do desastre prolongou-se durante anos, os sobreviventes ao desastre sofrem com problemas crónicos e imunitários e as novas gerações são também elas implicadas na herança tóxica (Greenpeace, 2002).



Figura 2.3 – Restos da antiga fábrica abandonada da Union Carbide.

Fonte: www.adst.org/2014/12/the-bhopal-chemical-disaster
(consultado a 3 de Janeiro de 2015)

1986, 26 Abril – Acidente em Chernobyl (Ucrânia) numa central nuclear. Na realização de um teste de segurança um dos reatores fragmenta-se e entra em autocombustão e a camada de isolante de 2000 toneladas do reator rebenta. O núcleo do reator fica exposto e liberta uma nuvem de fumo e vapor composto por diversas substâncias radioativas que de imediato se depositaram em redor da central (Figura 2.4). Momentos depois, surgem os primeiros meios de combate ao incêndio sem a proteção adequada para um contacto com elementos tóxicos. Foram as primeiras vítimas. Registraram-se 30 focos de incêndios e durante 15 dias foram despejados sobre o reator toneladas de materiais de forma a cobrir o principal foco de libertação de matéria radioativa. Uma trágica contaminação radioativa disseminou-se pelas localidades em redor da central nuclear. Após 28 anos, os efeitos sobre o meio ambiente e a saúde pública ainda são discutidos. Existe uma grande controvérsia sobre o número de vítimas, mas continuam a ser notificados problemas de saúde relacionados com a exposição aos gases tendo em conta que milhões de pessoas ainda continuam a viver nas zonas afetadas (Dupuy, 2007).



Figura 2.4 - Fotografia aérea sobre uma das zonas de impacto da explosão.

Fonte: www.stephenleahy.net/tag/chernobyl/ (consultado a 3 de Janeiro de 2015).

2001, 21 Setembro – Acidente em Toulouse (França) numa fábrica de produção de fertilizantes (AZF – Azote de France). A explosão ocorreu no piso de armazenamento de nitrato de amónio. Nesse dia a fábrica tinha sido autorizada a receber cerca de 500 toneladas

de substâncias químicas, 400 destas foram de nitrato de amónio. O químico estava armazenado nas condições corretas e separado em partes. Não se conseguiu apurar a causa do acidente. A explosão criou uma cratera, Figura 2.5, e desencadeou vários acontecimentos: a explosão provocou incêndios em 21 tanques da fábrica; a intensidade da explosão fez-se sentir a 3 km de distância, originando um sismo de 3,4 de magnitude na escala de Richter; a rede telefónica num raio de 100 km ficou afetada; 500 casas ficaram destruídas; 30 pessoas perderam a vida e mais de 2400 ficaram feridas. Este acidente trouxe impactes graves para o meio ambiente, com contaminação das águas subterrâneas e poluição atmosférica (Barthelemy et al.,2001).



Figura 2.5 – Destruição da fábrica após a explosão.

Fonte: www.les-verts-gannat.over-blog.com/article-le-match-sera-rejone--39718159.html (consultado a 3 de Janeiro de 2015).

Com a análise destes acidentes, incluindo todos os outros que ocorreram nos últimos anos, pode-se concluir que em toda a indústria onde se utilize matérias perigosas há um elevado risco de acidente, é necessário cumprir com todas as normas, sejam elas europeias ou nacionais como se vai analisar de seguida. O facto de ocorrer acidentes com matérias perigosas no século XXI mostra que nesta área a proteção/prevenção não evoluiu tanto como se pretendia. Não é demais salientar que as empresas/fábricas devem adotar todas as medidas necessárias de prevenção. É evidente que nesta área, os programas de simulação serão uma ferramenta importante pois, como se irá perceber, permitem estudos com diversos cenários de acidente e com os seus resultados seleccionar as principais medidas de proteção a adotar.

2.2. Importância da análise de riscos para a mitigação dos acidentes com matérias perigosas

Havendo próximo de zonas urbanas vários estabelecimentos industriais que utilizam materiais perigosos nos seus processos de produção, os acidentes graves que daí possam advir podem ter um maior impacto. Os acidentes atrás referidos mostram a heterogeneidade dos desastres que podem ocorrer, daí a necessidade de se analisar e avaliar todos os riscos a que as unidades industriais estão sujeitas. A análise de riscos permite às empresas adotar medidas de segurança, tanto para os trabalhadores como para a população na vizinhança da fábrica. A análise de riscos é utilizada como um “instrumento de mitigação e gestão de riscos” (Schenini et al., 2006, p.8). A generalidade dos autores defende quatro etapas na condução do processo de gestão: identificação, caracterização, avaliação e tratamento dos riscos provenientes do manuseamento de materiais perigosos durante os processos de produção, armazenamento ou transporte. São vários os autores, citados por Schenini et al. (2006), que discutem a gestão dos riscos (Sell (1995) ou Oliveira (1991)).

A aplicação de modelos de gestão de riscos consiste na adoção de protocolos sobre as medidas de segurança a respeitar nas operações com materiais perigosos. Na implementação da gestão dos riscos é importante que a legislação seja cumprida, e atualizada, de forma a garantir as condições de segurança necessárias nos estabelecimentos industriais.

As leis determinam o tipo de instalação consoante a sua produção e a quantidade de materiais perigosos utilizados. Existe um limiar de perigosidade e, neste sentido, existem vários estabelecimentos que não são abrangidos pela lei de acidentes graves, por possuírem autorização para uma pequena quantidade de materiais perigosos nas suas instalações. No entanto devem ser mantidos sobre vigilância e prevenção uma vez que existe risco de contaminação da população e do meio envolvente.

As fases de manuseamento ou de uso de matérias perigosas nas atividades ligadas à indústria são extremamente complexas devido ao risco que impõem. Estas fases devem ser realizadas por trabalhadores qualificados, cujos objetivos passam pela identificação dos produtos/materiais perigosos que estão a ser utilizados, pela análise de quais os riscos provenientes destes e como deve a avaliação desses riscos ser feita, tanto perante o

trabalhador como a instalação fabril em si. Os riscos devem ser tidos em conta perante a situação em que o trabalhador se encontra como perante o local onde a atividade se está a realizar, de modo a ser possível calcular os efeitos caso ocorra um acidente. Neste caso, para além da análise do produto perigoso, o trabalhador deve efetuar uma análise aos processos produtivos em que esses materiais serão utilizados, por exemplo localização e características de válvulas, de tanques, de depósitos pressurizados, entre outros, uma vez que apresentam um maior risco (Araújo, 2005).

Quanto ao armazenamento de materiais perigosos, os espaços das unidades fabris são os que maior risco representam na probabilidade de ocorrer um acidente grave. Um desses exemplos foi o acidente de 2001, em Toulouse, bem representativo do risco que constitui a armazenagem de produtos perigosos. Como já foi referido, o facto de muitas indústrias se localizarem perto de zonas urbanas faz aumentar o risco e consequentemente os danos que poderão ocorrer, tanto para a fábrica/trabalhadores como para a cidade/habitantes. No armazenamento de produtos químicos perigosos, é fundamental que estes estejam separados, devidamente embalados e num local estável. A ideia será que determinados produtos não se misturem, caso ocorra um acidente, que por natureza são extremamente inflamáveis quando combinados. Cada um deve ser armazenado de acordo com as suas especificidades e perigosidade, sendo importante a sua verificação, através de medições periódicas relativamente às condições a que os materiais estão expostos (Portal da Construção, consultado Março, 2014). A Tabela 2.2 representa o armazenamento correto de cada substância de acordo com as suas características, com a forma de armazenamento possível/indicado e com o local onde será armazenado.

Tal como no uso e armazenagem de matérias perigosas, o transporte deste tipo de materiais apresenta igualmente um risco. De acordo com Araújo (2005), esses riscos são tanto para o motorista como para o meio-ambiente, podendo provocar danos materiais no veículo e no património na vizinhança. À semelhança das instalações fixas, os sistemas de transporte de mercadorias perigosas estão regulamentados (Araújo, 2005). Desde o meio de transporte a ser utilizado, o tipo de substância, as vias que poderá utilizar na deslocação, como o tipo de

tanque a ser usado, todos devem ser analisados e avaliados de forma a conseguir-se o melhor e mais adequado transporte ¹, com os mínimos riscos.

Tabela 2.2 – Armazenamento de matérias perigosas em instalações industriais. (Adaptado do Portal da Construção – Guia técnico).

Tipo de substância	Recipiente	Ambiente	Substâncias incompatíveis	Medidas complementares
Explosiva	Resistente ao fogo	Temperatura moderada	Comburentes combustíveis	Limpeza
Líquida; gases combustíveis e inflamáveis	Robusto, resistente ao fogo	Temperatura abaixo do ponto de inflamação	Combustíveis sólidos; comburentes	Instalações elétricas antideflagrantes com ligação à terra
Comburente	Robusto, resistente ao fogo, estanque	Temperatura moderada	Combustíveis (em especial matérias orgânicas)	-
Tóxica	Resistente às radiações	Temperatura moderada; ventilação	Substâncias com as quais se combinem	-
Radioativa	Resistente às radiações	-	-	-
Corrosiva	Anti-corrosivo	Temperatura moderada, superior ao seu ponto de congelação; ventilação	-	Armazém com paredes e pavimento anti-corrosivo

O transporte de matérias perigosas pode ser realizado de duas formas: contínua ou descontínua. O transporte contínuo é realizado através de condutas e ocorre frequentemente em instalações petrolíferas ou de refinaria. Alguns autores consideram este tipo de transporte mais seguro que o transporte rodoviário ou ferroviário. No entanto, outros autores (Jo e Ahn, 2002) referem que uma falha no transporte por conduta pode levar a consequências

¹ Na contabilização dos acidentes com o transporte de materiais perigosos são contados todos aqueles que ocorram num dos seguintes meios:

- Redes viárias:
 - Rodoviária;
 - Ferroviária;
 - Via marítima;
- Condutas;
- Trásfega.

significativas, para pessoas, estruturas e ambiente, mais intensas que no transporte rodoviário. São numerosos os acidentes graves em condutas (Papadakis, 1999; Khan e Abbasi, 1999). Quando o transporte não é realizado de forma contínua, então este é procedido de forma descontínua, estando esta associada ao transporte rodoviário. Neste tipo de transporte é comum a utilização de transporte fracionado ou a granel. Num sentido generalizado, o transporte fracionado caracteriza-se por armazenar pequenos e médios volumes em vários recipientes, de forma a facilitar o acondicionamento e a manutenção das substâncias durante o seu transporte. O tipo de embalagem destinado a este género é selecionado em função das características físico-químicas do material a ser transportado, da sua resistência mecânica do reservatório e da manutenção necessária.

Por outro lado, o transporte a granel caracteriza-se pelo armazenamento de grandes quantidades num único recipiente, sendo normalmente a carga e descarga realizada por um sistema único. Nesta situação são utilizados tanques ou depósitos pressurizados. As operações de trasfega, necessárias neste tipo de transporte, isto é, cargas ou descargas de substâncias, são também um risco, sendo neste caso necessária grande atenção e equipamentos específicos para a transferência de material para que sejam garantidas todas as medidas de segurança. Neste tipo de operação é frequente a ocorrência de acidentes, sendo no entanto uma fonte difícil de analisar devido à incerteza da localização onde será efetuada e em que tipo de transporte (Oggero et al., 2006).

O transporte por vias ferroviárias de mercadorias perigosas é regido por legislação própria. Embora a taxa de probabilidade de um acidente poder ocorrer durante o transporte de mercadorias perigosas por vias ferroviárias seja menor do que ocorrer por vias rodoviárias, os potenciais danos que poderão surgir são normalmente maiores do que os registados em meio rodoviário, devido à quantidade de material que é transportado (Fabiano et al., 2005).

Outro meio de transporte utilizado no transporte de mercadorias perigosas é por vias marítimas ou fluviais. Um dos problemas mais frequentes neste transporte são as “fases” em que os acidentes podem ocorrer e quais os danos causados. Quanto às fases, quando o transporte é realizado por via marítima corre-se o risco de este acontecer quando o navio-transporte se encontra em águas nacionais; o navio-transporte se encontra em águas internacionais; à entrada/corredor de um porto; e durante as operações de trasfega (Ronza et

al, 2003). Neste sentido, uma avaliação do risco perante todas estas situações torna-se mais complexo. Um acidente envolvendo matérias perigosas transportadas em vias marítimas pode originar grandes repercussões tanto a nível económico, social e ambiental.

Avaliar a componente técnica do risco industrial não é simples, uma vez que isso exige uma análise de diversos fatores. Em particular, deve-se conhecer os efeitos que podem ser causados por riscos em locais industriais e no meio-ambiente envolvente, estimar a probabilidade de ocorrências desses riscos, saber como agir sobre a origem dos riscos de forma a limitar os seus efeitos, conhecer os espaços/territórios próximos das instalações industriais e compreender quais as componentes limitativas desses territórios (PPRT, 2007). Neste sentido, numa tentativa de controlar e avaliar os riscos provenientes de acidentes industriais relacionados com os materiais perigosos, cada país possui leis específicas de controlo e manutenção tanto dos espaços industriais que utilizam nos seus processos matérias perigosas, como no transporte destas. O mesmo acontece a nível europeu, no qual Portugal está enquadrado, e a nível mundial. A importância de decretos reguladores sobre o uso de materiais perigosos é uma forma de diminuir os riscos, e consequentemente os efeitos que estes terão.

2.2.1. Principal regulamentação europeia e nacional sobre as medidas de prevenção com matérias perigosas

Como foi mencionado anteriormente, toda atividade ou processo em que seja utilizado uma substância perigosa deve-se submeter a regras específicas aquando a sua utilização. Essas regras são utilizadas como uma forma de controlo e prevenção dos riscos que estão associados a esse tipo de matéria, cujos danos são frequentes como relatado nos diversos tipos de acidentes graves industriais.

As leis a aplicar são de carácter nacional ou de carácter europeu. A Comunidade Europeia determinou diretivas relacionadas com os materiais perigosos e o seu uso, que cada país pertencente à Comunidade teve de adotar. Ao mesmo tempo o governo português elaborou outras leis no controlo de materiais perigosos. No caso europeu, a principal diretiva é designada por Diretiva de Seveso. Criada após o acidente industrial grave em Seveso, que causou graves problemas ambientais, sociais e de saúde (tanto humana como animal), foi

elaborada com intuito de prevenir os acidentes graves, assim como limitar as suas consequências. A diretiva aplica-se a todas as matérias perigosas presentes nas indústrias em quantidades iguais ou superiores às permitidas. A mesma diretiva define que um acidente grave é uma ocorrência, como um fogo ou explosão, causado a partir de acontecimentos que ocorram em estabelecimentos que a diretiva abrange. Estes levam a sérios perigos/riscos para a saúde humana e/ou ambiental a curto e/ou médio prazo, dentro ou fora do estabelecimento e que envolva uma ou mais matérias perigosas. A diretiva alerta ainda para as obrigações necessárias na elaboração de planos de emergência internos e externos e na avaliação de um possível “efeito dominó” (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008).

Com o passar dos anos, a Comunidade Europeia sentiu a necessidade de fazer revisão à Diretiva, tendo em conta as mudanças sociais que se iam desenvolvendo e que afetavam as indústrias. A Diretiva de Seveso publicada em 1982, foi modificada em 1987 e em 1988. Estas duas modificações refletiram-se nas questões de armazenamento dos materiais perigosos em resposta aos dois graves acidentes que ocorreram na Índia (1982) e na Suíça (1986). Em 1996 surgiu a segunda diretiva Seveso II, direcionada para os acidentes graves com materiais perigosos. As principais introduções na lei foram: a revisão e alargamento do âmbito onde se enquadra; a introdução de novos requisitos em matéria de sistemas de gestão de segurança; elaboração de planos de emergência em caso de acidentes e uma planificação correta do “uso da terra”; e um reforço das orientações de controlo a usar pelos Estados-Membros. Também à luz dos acidentes ocorridos em Toulouse e noutras cidades, como dos estudos sobre substâncias cancerígenas e perigosas, a diretiva Seveso II introduziu modificações. Principalmente relacionadas com os riscos decorrentes das atividades de armazenamento e processamento no sector mineiro; com as substâncias pirotécnicas e explosivos; assim como com o armazenamento do nitrato de amónio (ANPC, consultado em Dezembro 2014). Em 2012, surge a diretiva Seveso III com uma melhor análise às questões relacionadas com os acidentes graves com substâncias consideradas perigosas. De acordo com a APA (2013), as principais alterações que se destacam nesta nova diretiva são:

- Compatibilizar a diretiva com as alterações do sistema europeu de classificação das matérias perigosas;

- Mais informação disponibilizada aos cidadãos sobre os riscos decorrentes de viver/trabalhar perto de indústrias que recorrem a materiais perigosos e sobre como agir em caso de acidentes;
- Regras mais eficazes sobre a forma como é planeado o “uso da terra”, seja para uso empresarial, como habitacional;
- Possibilidade de acesso judicial para indivíduos que não tiveram o adequado acesso à informação ou participação relacionado com o tema;
- Normas mais rigorosas nas inspeções aos estabelecimentos que utilizam materiais perigosos de forma a se conseguir uma maior aplicabilidade das regras de segurança.

Alguns dos diplomas de referência a nível nacional que regulam as medidas de segurança na armazenagem, fabrico e transporte de matérias perigosas são a seguir apresentados.

O decreto-lei n.º 254/2007 de 12 de Julho estabelece o regime de prevenção de acidentes graves que envolvam matérias perigosas de forma a limitar as consequências destes para o homem e para o ambiente. Este decreto-lei destina-se a todos os estabelecimentos que possuam matérias perigosas em quantidades iguais ou superiores às permitidas (Anexo I do decreto de lei n.º 254/2007). Ficam excluídos deste âmbito, por exemplo, os estabelecimentos militares ou das forças de segurança pública e o transporte em condutas localizadas no exterior dos estabelecimentos. O mesmo decreto remete para as câmaras municipais a responsabilidade de assegurarem, através dos planos municipais de ordenamento do território, “distâncias de segurança adequadas entre os estabelecimentos abrangidos pelo presente decreto-lei e zonas residenciais, vias de comunicação, locais frequentados pelo público e zonas ambientalmente sensíveis” (decreto-lei n.º 254/2007, Capítulo II, Artigo 5º). Como forma de garantir uma boa política de prevenção em relação aos possíveis acidentes graves relacionados com as matérias perigosas, o mesmo estabelece que o operador do estabelecimento é responsável por garantir proteção ao homem e ao meio-ambiente através de meios e sistemas de gestão adequados. No caso de estabelecimentos considerados com um nível elevado de perigosidade, a lei dita que devem ser elaborados relatórios de segurança que demonstrem que são postos em práticas os planos de prevenção, que os estabelecimentos são seguros e estáveis, que se realizaram planos de emergência a nível interno, por exemplo. No caso de ocorrer um acidente grave com matérias perigosas

num estabelecimento regido por este decreto deve de imediato acionar os mecanismos de emergência, comunicar a ocorrência e relatar à associação responsável -APA as circunstâncias e consequências do acidente e quais as matérias perigosas envolvidas. Todos os estabelecimentos que utilizem matérias perigosas são fiscalizados pela IGAOT, Inspeção-Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território.

No caso dos produtos explosivos a segurança dos estabelecimentos de produção e armazenamento é regulamentada pelo decreto-lei n.º 139/2002 de 17 de Maio. Este regulamento define as normas e os procedimentos especiais de segurança que os estabelecimentos ligados à produção de materiais explosivos devem ter quanto à implantação, organização e funcionamento destes. Todos os estabelecimentos devem possuir, de forma organizada e atual, o referencial de segurança que inclui: “a) manual de segurança (MS); b) estudos de segurança (ES); c) plano de emergência interno (PEI)” (decreto-lei n.º 139/2002, Capítulo I, Artigo 2º). Nos estudos de segurança devem estar incluídos os perigos, a análise dos riscos, a natureza em que os acidentes podem ocorrer, a avaliação das consequências, assim como os meios de prevenção e mitigação. Quanto à armazenagem, como regra geral, na mesma unidade “não se armazenam na mesma unidade produtos que apresentam risco de fogo com produtos que apresentam risco de explosão, produtos de natureza comburentes com produtos de natureza combustível, ou produtos cuja estabilidade química, grau de inflamabilidade ou de sensibilidade ao calor, ao choque ou fricção sejam muito diferentes” (decreto-lei n.º 139/2002, Capítulo IV, Artigo 19º). A lotação máxima de cada armazém é definida pela autoridade competente para o licenciamento destes.

Os espaços onde serão acondicionadas as embalagens das matérias perigosas devem corresponder aos critérios serem “arrumadas sobre estrados, designadamente de madeira, com um mínimo de 5 cm de altura, de modo a constituir uma ou mais pilhas, afastadas umas das outras pelo menos 1 m, e das paredes e dos tetos pelo menos 60 cm, e de forma a assegurar um fácil acesso e uma boa ventilação, e a diminuir as possibilidades de decomposição simultânea dos produtos armazenados” (decreto-lei n.º 139/2002, Capítulo IV, Artigo 20º). Quanto às questões de segurança neste tipo de estabelecimentos deve ser cumprida, tendo como base uma sinalética adequada ao tipo de produtos que são utilizados

e aos riscos que um trabalhador ou visitante pode correr, devendo existir equipamentos específicas e uma vigilância ativa. A mesma segurança deve ser garantida relativamente às distâncias de segurança a que estes estabelecimentos podem-se localizar (Anexo VII do decreto-lei n.º 139/2002) de forma a evitar a propagação de uma explosão/incêndio para áreas vizinhas.

O transporte de mercadorias perigosas também é regulamentado, quer a nível nacional como internacional. No que diz respeito ao transporte por vias terrestres, o decreto-lei n.º 41-A/2010 de 29 de Abril é o regulamento nacional em vigor, e deve ser revisto bianualmente. Este documento, elaborado em conformidade com a diretiva europeia n.º 2008/68/CE, remete para o transporte terrestre de mercadorias perigosas que corresponde, igualmente, aos direitos e deveres que os países da comunidade europeia devem seguir. Neste sentido, pretendeu-se criar regras uniformes para o transporte destas mercadorias dentro da União Europeia, garantindo um mercado comum e sem restrições. Este mesmo decreto também regula o transporte ferroviário de mercadorias perigosas. Todas as operações de trasfega, transferências do material entre transportes e as paragens exigidas devido às condições do transporte, desde que realizadas nas vias do domínio público, bem como em outras vias que estejam abertas ao trânsito, são alvo deste documento legal. O decreto encontra-se dividido, com regras específicas para o transporte rodoviário com o Regulamento do Transporte de Mercadorias Perigosas por Estrada, no qual está incluído o Acordo Europeu Relativo ao Transporte Internacional de Mercadorias Perigosas por Estrada (ADR), e com regras específicas para o transporte ferroviário com o Regulamento do Transporte de Mercadorias Perigosas por Caminho-de-ferro, correspondendo as mesmas disposições do Regulamento Relativo ao Transporte Ferroviário Internacional de Mercadorias Perigosas (RID).

O regulamento de transporte de mercadorias perigosas por estrada estabelece as regras relativas:

- Às mercadorias;
- Ao acondicionamento e rotulagem;
- Às condições de construção, equipamento e operação dos veículos;
- À exploração e documentação de veículos autorizados para o transporte.

No caso das mercadorias perigosas que são autorizadas para transporte nacional e internacional estão, no presente decreto-lei, classificadas devidamente consoante os seus critérios químicos, definidas quanto ao tipo de embalagem e de cisterna passível de ser utilizado, organizadas em função do tipo de expedição (incluindo toda a documentação, meios de sinalização, etc.) e definido como o meio de transporte pode ser utilizado, neste caso, para operações de trasfega ou carregamento comum.

O regulamento de transporte de mercadorias perigosas por vias ferroviárias estabelece as regras relativas:

- Às definições, medidas de segurança e prevenção, regras para a segurança pública;
- À classificação dos materiais por classes de transporte e as disposições específicas de cada classe;
- Às quantidades permitidas/limitadas e excetuadas;
- À utilização e à construção das embalagens e das cisternas;
- Às condições de transporte, trasfega e manuseamento;
- À exploração e documentação de veículos autorizados para o transporte.

No RID, as mercadorias perigosas são classificadas em 9 classes e a sua classe é determinada em função das propriedades. A afetação de uma mercadoria a uma classe e a um grupo de embalagem, assim como a “atribuição de um ou mais riscos subsidiários a uma matéria ou a um objeto perigoso efetua-se segundo os critérios da classe ou classes que correspondam a esses riscos” (decreto-lei n.º 41-A/2010 (RID), Parte 2, Capítulo 2.1 (2.1.2.1)) estão definidos legalmente. As quantidades limite passíveis de serem transportadas, assim como as excetuadas, estão definidas neste regulamento. Cabe aos responsáveis que transportam estas mercadorias e aos responsáveis das entidades responsáveis pelo transporte garantirem o cumprimento de todas as disposições legais apresentadas no mesmo decreto, quer em território nacional como internacional.

No que diz respeito ao transporte de matérias perigosas por via marítima encontra-se, igual e devidamente, legislada em Portugal em conformidade com as diretivas europeias. A lei portuguesa n.º 164/96 de 5 de Setembro é a que regulamente este tipo de transporte em portos nacionais, completando-a o Código Marítimo Internacional das Mercadorias Perigosas, que regulamenta o transporte em vias marítimas internacionais. O documento refere as regras

necessárias para o transporte seguro que devem ser tidas em conta pelos operadores, carregadores e comandantes dos navios-transporte. Todos os navios que transportem estas mercadorias, incluindo igualmente mercadorias poluentes, devem possuir toda a documentação necessária em conformidade com a lei, de forma a que seja permitida, em segurança, a viagem, a entrada nos portos, a carga/descarga das mercadorias. Todo o navio e mercadoria devem estar devidamente classificados, rotulados e armazenada conforme as regras.

Neste âmbito, é importante mencionar a questão das atmosferas explosivas. Os processos industriais ocorrem em ambientes suscetíveis a explosões devido ao uso de matérias-primas que contribuem para essas fragilidades. Assim, é importante abordar as diretivas europeias que estabelecem padrões necessários de proteção nestas áreas e a transposição destas para as diretivas nacionais.

Entende-se como atmosfera explosiva, ou atmosfera ATEX, “uma mistura com ar, em condições atmosféricas, de substâncias inflamáveis, sob a forma de gases, vapores, névoas ou poeiras, na qual após a ignição, a combustão se propague a toda a mistura não queimada” (Decreto-lei n° 236/2003, Artigo 3°). São consideradas atmosferas explosivas todas as que apresentam potencial risco de explosão bem como todas as que apresentam características de inflamabilidade. Quando num local há informação de que existem substâncias que possam gerar atmosferas explosivas implica um conhecimento prévio desses mesmos materiais, para que se possa caracterizar o seu comportamento e os perigos que possam vir a representar. Assim, podemos destacar: características das substâncias (desde a temperatura de inflamação; limites de inflamabilidade/explosividade; energia mínima de ignição) assim como a temperatura do local. Ou seja, por exemplo, é possível que a mesma substância seja considerada ATEX em determinadas unidades de processo mas que não o seja noutra unidade onde nunca será atingida a sua temperatura de inflamação. Como substâncias que podem originar atmosferas explosivas consideram-se os líquidos inflamáveis (tais como solventes, combustíveis, etanol), os gases inflamáveis (tais como o hidrogénio, gás natural, butano, propano) e as poeiras de matérias sólidas (poeiras de carvão, cortiça, matérias plásticas) (Santos, 2011).

Quanto à regulamentação sobre as atmosferas explosivas assenta essencialmente em documentos que visam a proteção nos espaços onde existe maior probabilidade de ocorrer explosões. Com o intuito de garantir a proteção de pessoas e bens em locais de risco de explosão, a União Europeia elaborou duas diretivas sobre ATEX. A primeira, diretiva 94/9/CE de 23 de Março especifica os requisitos técnicos dos equipamentos e sistemas de proteção a serem utilizados em locais com potenciais atmosferas explosivas. Uma vez que esta diretiva assenta essencialmente sobre os equipamentos que são utilizados, a União Europeia complementou com uma nova diretiva, 99/92/CE de 16 de Dezembro, em que são especificados os requisitos de proteção para segurança de todos os trabalhadores que são expostos a riscos decorrentes das atmosferas explosivas durante as atividades laborais. A nível nacional, o governo português transpôs a diretiva de 1999 para o Decreto-Lei nº 236/2003 de 30 de Setembro. Este assume as condições mínimas de promoção de proteção da segurança e saúde dos trabalhadores que estão suscetíveis à exposição de riscos das ATEX. Todas estas regulamentações são aplicadas a grande parte dos ramos de atividade, como por exemplo: aterros sanitários, empresas de reciclagem, indústria alimentar, empresas de distribuição de gás, refinarias, entre outros.

De uma forma mais específica, as diretivas baseiam os seus requisitos em outros âmbitos de proteção importantes que vão desde a classificação de zonas e ambientes, classificação das áreas de risco e as normas aplicáveis aos modos de proteção (Anexo A).

2.2.2. Programas de simulação de explosões e dispersão de gases: potencialidades e fraquezas

Apesar das diretivas criadas após o acidente de Seveso e de outra legislação nacional, o acidente na fábrica em Toulouse mostrou que não foram suficientes no controlo e mitigação de acidentes com materiais perigosos. Isto mostrou a necessidade de um maior conhecimento sobre os riscos, sobre as medidas de prevenção e sobre o planeamento urbano, pois medidas de gestão em caso de acidente dependem de um profundo conhecimento dos riscos (Barthelemy et al., 2001). Como já foi referido, sendo os riscos vistos como a probabilidade, num determinado período de tempo de um acidente acontecer e da magnitude dos danos causados é nesta análise que se devem basear as indústrias de produção e armazenagem de materiais perigosos para adotar medidas preventivas e de mitigação. Barthelemy et al. (2001)

defendem que os estabelecimentos que recorrem a substâncias consideradas perigosas nas suas linhas de produção devem perceber a importância dos estudos/análises sobre os riscos com esses materiais. Os estudos, através da avaliação de diferentes cenários de acidente (ruptura de tanque ou de uma tubagem, sismos/terramotos, despiste, descarrilamento ou choque de veículos de transporte) permitem compreender como podem e devem esses materiais ser manuseados, armazenados e transportados.

A necessidade de melhorar as ferramentas disponíveis para analisar, avaliar, simular e ajudar na tomada de decisão perante perigos e riscos decorrentes do uso, armazenagem e transporte de materiais perigosos, tem conduzido ao desenvolvimento de programas de simulação, que permitem rapidez na obtenção de resultados e menor custo, quando comparados com os custos laboratoriais, que incluem compra de equipamentos e criação de infraestruturas e áreas de segurança.

Muitos dos programas de simulação incorporam modelos físicos e matemáticos predefinidos e bibliotecas de base de dados com propriedades de materiais. A informação que contém sobre compostos químicos, bem como as suas propriedades permite que sejam bastante funcionais e tornem rápido o carregamento da informação para o cálculo.

Permitem simular cenários de potenciais acidentes. É possível estimar danos, perceber quais as distâncias de segurança a adotar, bem como desenvolver medidas de mitigação.

A parte experimental não deve ser esquecida, uma vez que os programas estão condicionados a modelos teóricos que nem sempre conseguem reproduzir a situação real. Os resultados experimentais, quando possíveis de obter, são um enorme contributo para a validação dos modelos adotados.

Para Quaranta et al. (2002) um programa de previsão dos efeitos causados por um acidente, deve conter modelos que permitam calcular nomeadamente:

- Distância à qual as concentrações de gases tóxicos e inflamáveis são inferiores a um valor limite,
- Dispersão dos gases de um acontecimento de *pool fire*;

- Distância à qual a sobrepressão gerada pela explosão danifica um alvo especificado pelo utilizador.

2.3. Principais programas de simulação de fenómenos com materiais perigosos e suas aplicações

Dentro do vasto número de programas disponíveis para uma avaliação de risco com componentes químicos perigosos, estes destacam-se pela maior ou menor fiabilidade dos dados gerados, pelo número de cenários e impactos que permitem analisar ou por disponibilizarem ferramentas de fácil acesso ou mais complexas. Neste grupo é ainda determinado quais os programas que podem ser adquiridos de forma gratuita, aqueles que necessitam de autorizações específicas e os que a sua aquisição de licença envolve custos. Todos eles, à sua maneira, possuem vantagens e desvantagens em função daquilo que permitem analisar, avaliar e determinar.

Dentro dos programas de acesso livre na internet, os utilizadores têm à disposição um sistema produzido pela Environmental Protection Agency” (EPA), em conjunto com a “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA), que engloba vários programas de simulação, capazes de planear uma resposta a situações de emergências químicas, designando-se por CAMEO. Pode ser adquirido diretamente, através do site da EPA.

Os utilizadores mais comuns do sistema integrado CAMEO são:

- Bombeiros;
- Comissões de resposta a emergências;
- Indústria;
- Organizações ambientais;
- Departamentos de Polícia.

O CAMEO enquanto sistema é, ainda, composto por outras aplicações pertencentes à mesma empresa, como por exemplo o CAMEO_{fm}/CAMEO *Chemicals* e o MARPLOT. No entanto, a aplicação CAMEO e a ALOHA são as mais importantes para as simulações pretendidas.

No geral, o programa permite a criação de bases de dados relativas aos planos de emergência acionados, nas quais é possível especificar quais os materiais químicos utilizados, o tipo de acidente e informações sobre o local onde ocorreu (*CAMEO_{ofm}*). Disponibiliza uma base de dados com informações sobre milhares de químicos (*CAMEO Chemicals*). Este inventário químico permite ao utilizador analisar as propriedades de cada elemento, assim como a perigosidade que lhe está associada. É, ainda, possível elaborar uma lista pessoal de químicos com o objetivo de perceber que tipos de químicos podem ser combinados ou não. Através do MARPLOT, uma aplicação mais geográfica, podem ser utilizados mapas que permitem a seleção de áreas específicas que poderão ser afetadas por materiais químicos caso ocorra um acidente, ou seja, o mapa permite a visualização geográfica da dimensão do acidente e a determinação dos impactes.

A aplicação ALOHA é um modelo de dispersão atmosférica que avalia a libertação de químicos para a atmosfera, permitindo um cálculo da nuvem química com base nas características toxicológicas e físicas das substâncias libertadas. É possível estimar quais as zonas que poderão ser afetadas pela nuvem ou pelos resíduos desta, incluindo nuvens tóxicas de gases, incêndios ou explosões, tal como identificar o tipo de fonte de onde surgiu o acidente. O utilizador pode exportar a informação para coordenadas geográficas e obter mapas informativos. Permite, igualmente, a avaliação de um cenário em ambiente fechado relativamente à taxa de infiltração de gases químicos e à concentração desta no interior de um edifício.

O BREEZE é um outro programa de simulação mais completo, no entanto requer custos de aquisição. Assume-se como um programa de modelação de explosões com base em dois modelos: HEXDAM e VEXDAM e é usado na prevenção dos efeitos humanos e estruturais de uma explosão numa infraestrutura. Os dois modelos têm em consideração: efeitos de pressão, efeitos de blindagem/proteção, efeitos das explosões secundárias, nível de danos/prejuízos, entre outros.

No programa HEXDAM, utilizado para casos de grandes explosões, os utilizadores podem criar a simulação numa zona do edifício que pretendem avaliar, podendo utilizar plantas de edifício já pré-definidos no programa, assim como explicitar os motivos de ocorrência dessa explosão. Quanto ao programa VEXDAM, é utilizado para explosões em nuvens de vapores.

Basta ao utilizador identificar o combustível, o número e localização das “sub-nuvens” que se criaram com a explosão, a massa do combustível e a sobrepressão gerada pela explosão. Neste caso, também existe a possibilidade de adaptar a planta do local da explosão ao pretendido ou utilizar os dados padrão. Na situação em que se pretende definir a própria planta do local, os utilizadores têm de colocar os dados da infraestrutura: coordenadas X, Y e Z, dimensões da estrutura, orientação e número de divisões do espaço. No entanto, os modelos pré-definidos que o programa possui contêm os elementos estruturais padrão da maioria dos edifícios permitindo uma fácil utilização. Como na grande maioria dos programas de simulação, o BREEZE representa os resultados através de gráficos, neste caso os danos estruturais e humanos são representados através de um esquema que se baseia em 4 cores conforme o nível do dano: sem dano, dano ligeiro, dano moderado, dano grave (Grosh e Tatom, 2004).

Considerado, pelo seu fabricante (DNV GL), como a melhor ferramenta de *software* de análise de risco e mais abrangente do processo industrial no mercado, o programa PHAST analisa o progresso de um potencial incidente no início da libertação dos materiais perigosos até à sua dispersão. Este programa contém modelos pré-definidos para análise desses incidentes com diversos químicos, tais como detonação, inflamação e explosão. Assim como apresenta os efeitos daí recorrentes: efeitos de radiação, jatos de fogo e “pool fires”, por exemplo. Mais uma vez, os resultados são exibidos através de gráficos ou tabelas e são analisados os efeitos sobre a população em redor do acidente assim como uma avaliação do impacte no ambiente (Zimmerman, 2009). Os utilizadores podem obter este programa de 3 formas: aceder gratuitamente ao Phast Lite (uma versão reduzida do original, logo com menos funcionalidades), pedir acesso a uma versão trial do programa original ou subscrever o programa anualmente.

Com a mesma base de análise e avaliação dos acidentes, o FLACS é um programa de modelação para dispersão e explosão, mas que se distingue pela utilização em 3D dos cenários de acidente. É essencialmente utilizado em estudos para processos industriais com recursos a combustíveis e gases que originam explosões. O programa apresenta também possíveis efeitos de mitigação e medidas de prevenção (Chillè, 2013). Apesar da principal característica ser a apresentação 3D, também tem disponível visualização dos resultados 2D

ou em texto. Este *software* pode ser adquirido por pagamentos mensais ou anuais, como uma versão *trial* de um mês ou por funcionalidades (modelo de dispersão ou modelo de explosão) (Chillè, 2013).

Como se pode verificar, e apesar de só serem mencionados aqui alguns, existem vários programas de simulação/modelação tanto para acidentes para simulação de explosão, como para simulação de dispersão. Pode-se sempre optar por programas gratuitos ou por versões *trial*, no entanto as desvantagens desses programas são, principalmente, o baixo número de cenários que são possíveis de prever e o facto de utilizarem cálculos simples que também não permitem uma grande abrangência dos resultados esperados. Por seu lado os programas que exigem o pagamento de licenças possuem ferramentas de cálculo, modelação gráfica e análise mais avançadas, proporcionando maior fiabilidade nos resultados e uma melhor interpretação destes para a elaboração de medidas adequadas (Lewis, 2008).

Cada um tem as suas próprias características, daí não ser possível definir um como o melhor programa do mercado, cada empresa/utilizador deverá escolher o programa que melhor se adapta aos estudos pretendidos (Anexo B).

3. EXPLORAÇÃO DO PROGRAMA EFFECTS 9®

3.1. Breve introdução sobre a escolha de cenários e opções

O *software* EFFECTS 9® foi o programa escolhido para explorar as suas capacidades de simulação de cenários de acidentes industriais com matérias perigosas. Este programa possui várias versões. Neste estudo usar-se-á a versão mais recente, o EFFECTS 9®, apesar de ser uma versão Educacional. Este programa foi desenvolvido pelo TNO, Holanda, através do TNO Department of Industrial and External Safety.

O *software* EFFECTS 9® é um programa de fácil acesso para o utilizador, com uma enorme variedade de cenários de simulação característicos de indústrias químicas, que utilizam diversas matérias perigosas nos seus processos industriais, em armazenamento e no transporte. O programa dispõe de diversas ferramentas que permitem: a identificação de perigos, uma análise e controlo de segurança, uma análise quantitativa do risco, através da simulação dos danos causados com químicos tóxicos e inflamáveis (TNO, 2012). Permite, por exemplo, prever os efeitos físicos da fuga de materiais perigosos, através das concentrações de gases tóxicos ou dos níveis de radiação térmica e picos de sobrepressão associados à explosão. Os resultados das simulações efetuadas são apresentados através de textos ou gráficos.

O programa contém uma série de modelos, baseados no Yellow Book, que permitem entre outros a simulação da evaporação de líquidos voláteis (“pool evaporation”) e a dispersão atmosférica de gases (“atmospheric dispersion”). São disponibilizadas informações sobre cada modelo. Uma das vantagens para o utilizador é a possibilidade de interligação de modelos (“linking of models”). Isto é, o programa permite transferir automaticamente os parâmetros de entrada e saída de um modelo anterior para os parâmetros de entrada de um modelo seguinte. Por exemplo, o parâmetro de saída “taxa de libertação representativa” (“representative release rate”), calculado através de um modelo de libertação é,

automaticamente, transferido como um parâmetro de saída de “taxa de fluxo de massa da fonte” (“mass flow rate of the source”) do modelo de dispersão subsequente (TNO, 2012). Estão ainda disponíveis modelos combinados (“combined models”), ou seja, modelos pré-definidos que funcionam como uma espécie de árvore, permitindo uma variedade de resultados, possibilitando o cálculo de todas as possíveis consequências da libertação de materiais perigosos num acidente.

O Yellow Book disponibiliza as equações que servem de base para os cálculos aos modelos representativos dos diferentes cenários, sendo eles:

- “Release”;
- “Pool evaporation”;
- “Atmospheric dispersion”;
- “Heat radiation and combustion”;
- “Explosion”.

Todos eles são modelos gerais de efeitos, existindo dentro de cada um outros modelos mais específicos, adequados a cada cenário possível de acontecer durante um acidente com matérias perigosas. Dentro dos exemplos possíveis de simular com o programa através dos modelos do Yellow Book temos: a libertação de gases de uma conduta, a libertação instantânea de líquidos, entre outros.

Quanto à interface utilizada pelo programa tem vindo a melhorar ao longo das várias versões. O EFFECTS 9® é a versão mais recente, oferece uma interface mais simples com menos comandos, mas com todas as funcionalidades que o utilizador pode utilizar de forma mais intuitiva.

A Figura 3.1 mostra a interface gráfica do utilizador (“Graphical User Interface”), na qual se incluem todas as ferramentas principais do programa. A interface está organizada por seções/área que são descritas de seguida:

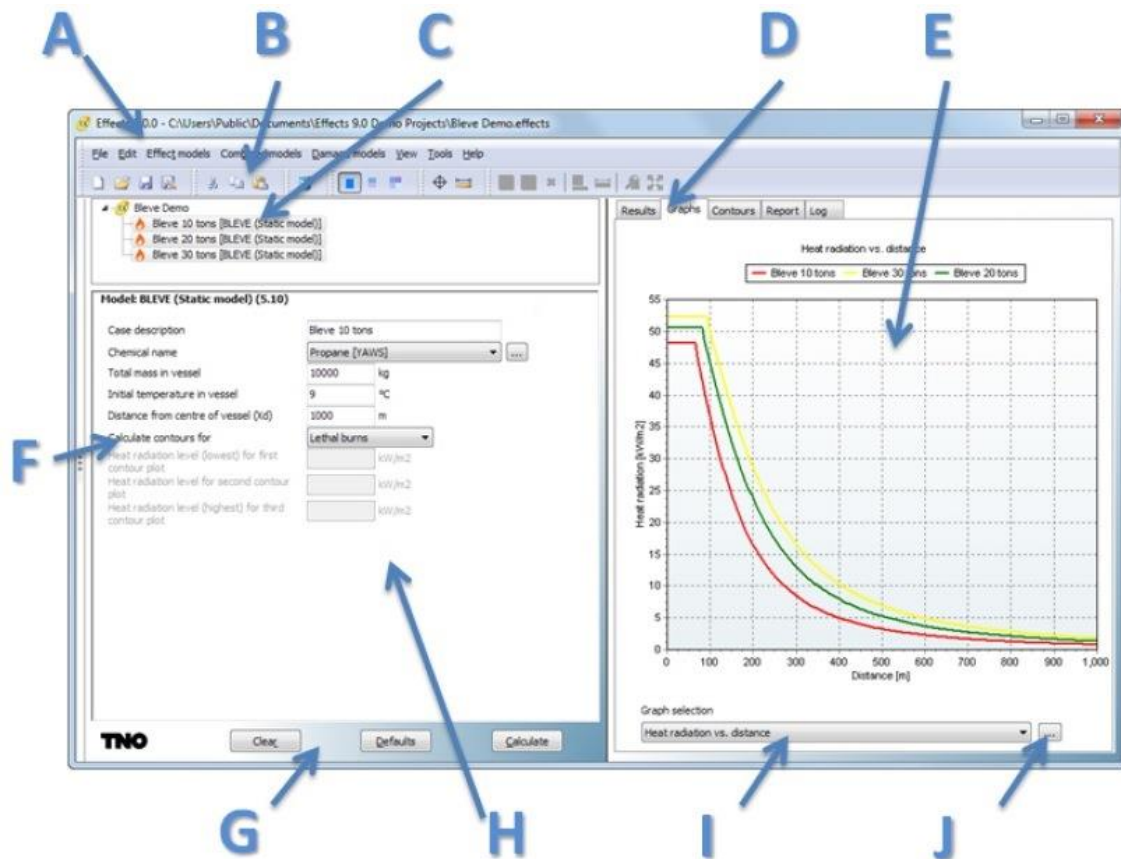


Figura 3.1 - Interface do software EFFECTS 9® (TNO, 2012).

- “Menu bar” (barra de menus) - A
- “Toolbar” (barra de ferramentas) - B
- “Model navigation tree” (árvore de navegação do modelo) - C
- “Results panel tabs” (painel de resultados) - D
- “Graphs display panel” (painel de representação gráfica) - E
- “Model selection panel” (painel de seleção de modelo) - F
- “Command buttons” (botões de comando) - G
- “Model input panel” (painel de modelo de entrada) - H
- “Graph selection box” (caixa de seleção gráfica) – I
- “Graph expert button” (opções avançadas dos gráficos) - J

Para cada modelo, o utilizador seleciona o que melhor se enquadra para as suas análises, adequando o tipo de parâmetros que pretende preencher. Desta forma, o programa disponibiliza três modos operacionais: modo simples/ modo normal/ modo avançado. No painel dos resultados o utilizador pode selecionar se pretende a apresentação dos mesmos

através de gráficos ou como relatórios de texto. Para os resultados obtidos, o utilizador pode alterar e adaptar o tipo de gráfico, pois estes apresentam sempre o tempo ou a distância em função de um parâmetro de resultados, tais como a radiação térmica em função da distância, ou a concentração versus tempo.

Para facilitar a introdução e a leitura dos dados resultantes do programa é possível alterar as suas unidades, como mostra a Figura 3.2. Desta maneira torna-se desnecessário realizar qualquer redução, bastando alterar a unidade para a qual o valor recolhido se apresenta.

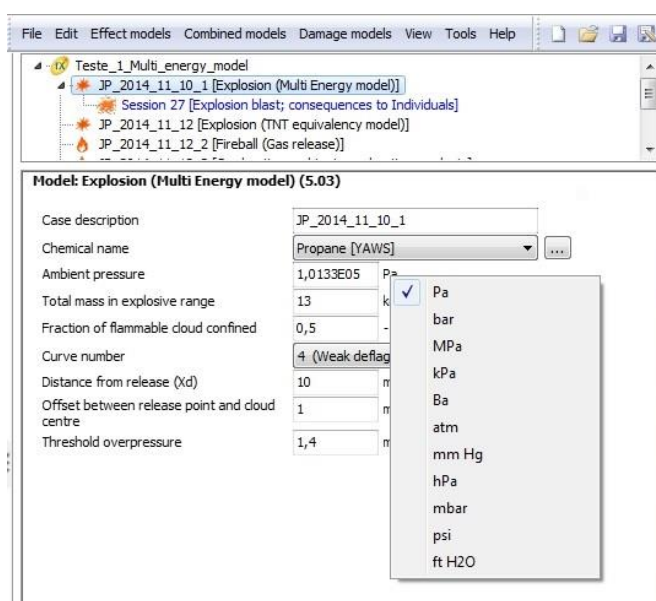


Figura 3.2 - Diferentes possibilidades para unidades.

Sendo um *software* de simulação tem como importante ferramenta a possibilidade de comparação de resultados. Quando selecionados vários modelos, os resultados, em formato de relatório, são mostrados em diferentes colunas. Os valores das entradas e saídas, nas quais os valores variam, são apresentados a negrito, como se pode ver na Figura 3.3.

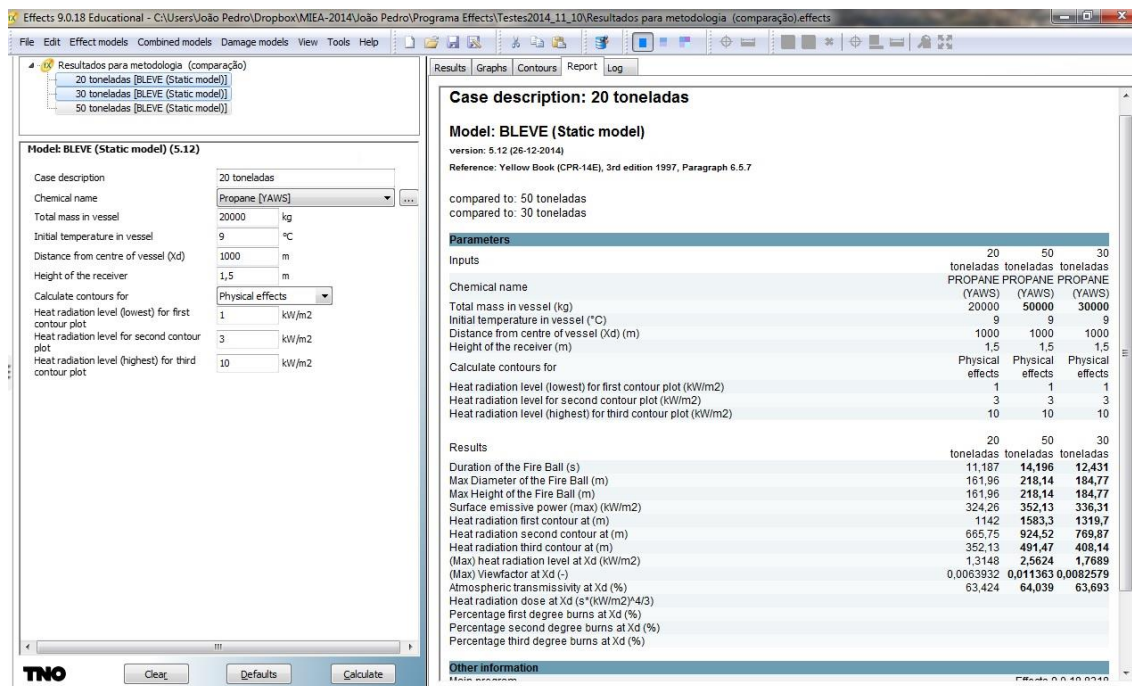


Figura 3.3 - Comparação dos modelos.

Na base de dados (YAWS) não só se pode escolher a substância que pretendemos estudar, como visualizar uma vasta informação complementar à que é necessária para os cálculos.

Como se pode analisar, no caso do butano, na Figura 3.4, é possível verificar as suas propriedades constantes.

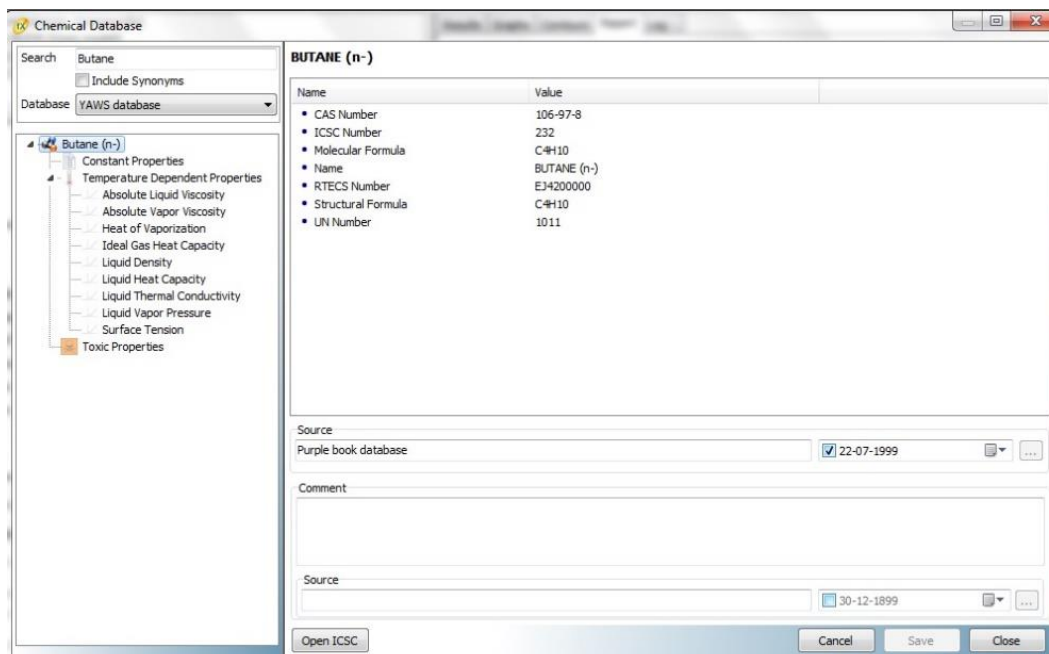


Figura 3.4 - Propriedades constantes butano.

É possível uma análise de propriedades que dependem da temperatura, como ilustra a Figura 3.5, onde é apresentada a viscosidade do líquido em função da temperatura.

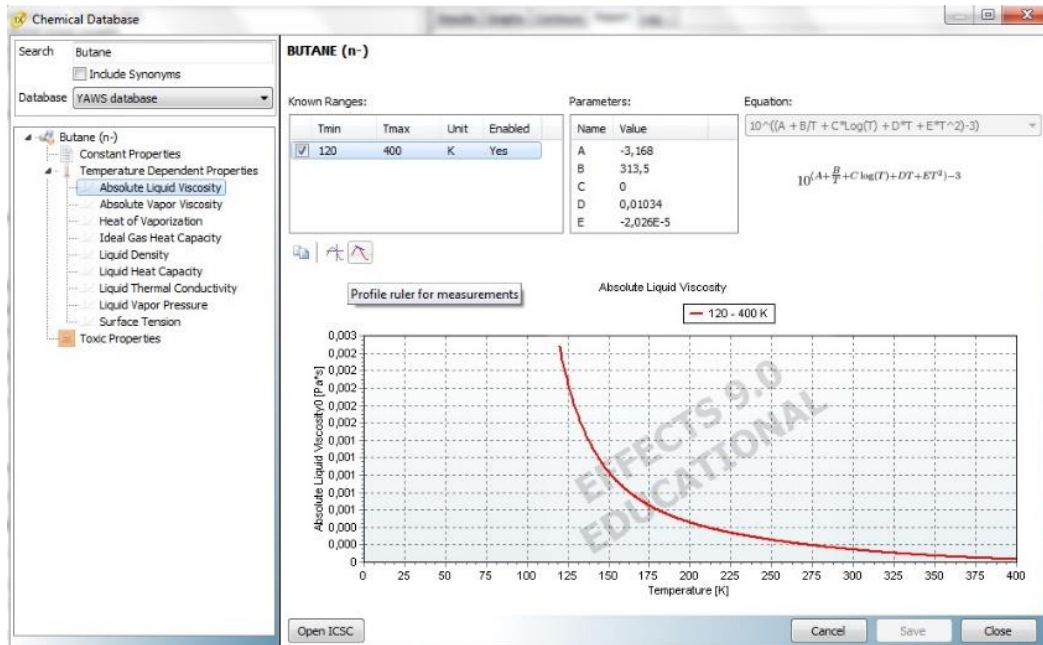


Figura 3.5 - Viscosidade do líquido em função da temperatura.

Bem como ilustrado na Figura 3.6 a sua relação com a pressão de vapor.

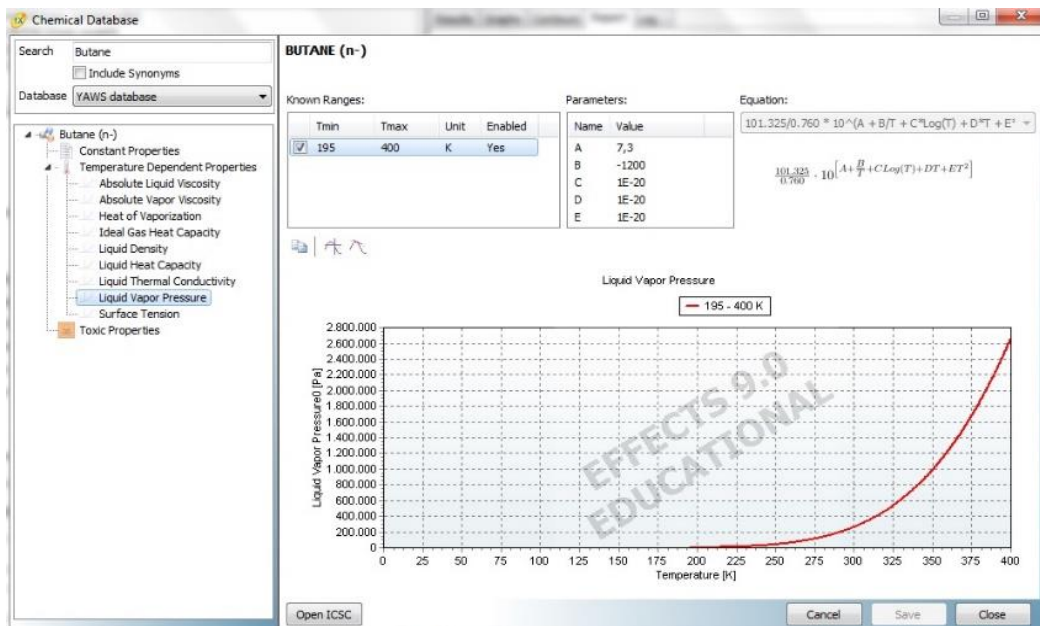


Figura 3.6 - Pressão de vapor em função da temperatura.

3.2. Cenários e modelos explorados

Como se tem vindo a salientar ao longo deste trabalho é importante cumprir e adotar medidas de prevenção de acidentes em unidades industriais que utilizem matérias perigosas. A toda a legislação, seja de nível nacional como europeu, podemos associar o uso dos programas de simulação. Como foi referido anteriormente estes permitem fazer análises de vários cenários de acidentes em função das variáveis que se queiram estudar.

Neste subcapítulo será feito um estudo/análise de algumas opções de modelos físicos disponíveis para simular e quantificar os efeitos de um acidente no homem, nas estruturas e no meio ambiente. Esses mesmos modelos serviram também como base de cálculo no programa de simulação escolhido (EFFECTS 9®). Os dados para o cálculo manual dos modelos físicos de simulação são retirados dos livros Yellow book e Chemical Process Safety e serão enumerados todos os passos necessários associados a cada método estudado. O objetivo do cálculo manual é compreender toda a metodologia por detrás dos cálculos que cada método envolve, perceber que tipo de variáveis utiliza e qual a importância destas no resultado final. Os modelos a estudar são: Multi-Energy, TNT Equivalency e BLEVE.

Através dos resultados obtidos de forma manual será então criado o cenário no EFFECTS 9®, sendo posteriormente comparados os resultados obtidos pelos dois processos. De forma, a perceber a importância das variáveis e os seus valores nos resultados dos diferentes cenários, irá ser feita uma análise comparativa com a alteração de algumas das variáveis de entrada utilizadas. Isto permitirá perceber a influência que as variáveis de entrada poderão ter nos efeitos de um possível acidente.

De seguida será feita uma breve caracterização de cada método, bem como a sua resolução de forma manual e apresentação de resultados gerados pelo programa de simulação.

3.2.1. Método Multi-Energy

A conclusão de que um ambiente parcialmente confinado e/ou obstruído oferece as condições adequadas para uma deflagração é cada vez mais admitida na literatura, uma vez que a energia gerada em zonas obstruídas ou confinadas resulta em sobrepressões. A

pesquisa experimental dos últimos anos mostrou claramente que o regime de deflagração ocorre apenas em algumas partes inflamáveis da nuvem de vapor (VCE), estando estas confinadas ou obstruídas. Entende-se como zona obstruída ou confinada aquela onde os obstáculos que nela estão presentes, em redor da nuvem de explosão, geram turbulência e aceleram a chama no seu interior (Crowl, 2002).

Neste caso, como este modelo permite uma abordagem mais realista do que acontece em determinadas partes da nuvem, cada região obstruída na nuvem é tratada de forma individual como uma fonte de explosão (Figura 3.7).

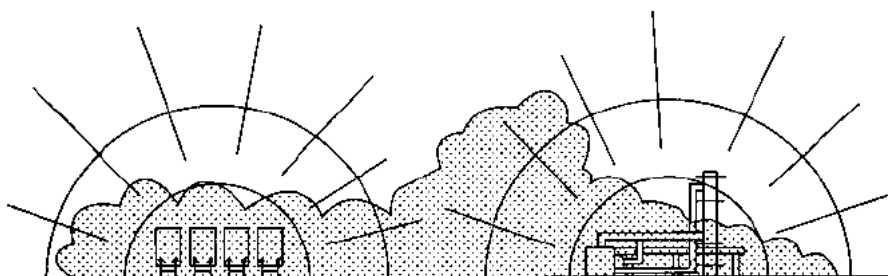


Figura 3.7 – Nuvem de vapor com duas explosões em regiões confinadas.

O método Multi-Energy permite assim estimar explosões em nuvens de vapor com pressão variável. Este baseia-se na simulação numérica de uma onda de choque a partir de uma nuvem inflamável com chama a velocidade constante. Variando a velocidade da chama, produz-se um conjunto de curvas para diferentes níveis de pressões de explosão, a partir do centro da nuvem. Os efeitos das curvas dependem da distância ao centro. A pressão das curvas de explosão situa-se numa escala de 1 a 10. Para uma nuvem detonante é usada a curva 10. Para uma deflagração são utilizadas as curvas de 1 a 9 (Bjerketvedt et al., 1997).

Com base nos dados da Tabela 3.1 efetuou-se o cálculo manual do modelo Multi-Energy para estimar a efeitos da explosão resultantes de uma fuga de propano:

Tabela 3.1 - Dados para aplicação do modelo Multi-Energy.

Nome da substância	Propano
Pressão atmosférica [Pa]	$1,013 \times 10^5$
Massa total de explosivo [kg]	13
Fração do confinado [-]	0,5
Número da curva de explosão	5 (Deflagração média)
Distância a que ocorre a fuga de gás [m]	50
Distância entre o lançamento e o centro da nuvem [m]	1
Limite de sobrepressão [mbar]	60

Massa do confinado:

$$M_c = M_t \times F_c \quad (1)$$

Onde:

Mc: Massa confinada [kg]

Mt: Massa total [kg]

Fc: Fração de massa confinada [-]

Então:

$$M_c = 13kg \times 0,5 \leftrightarrow M_c = 6,5kg$$

Energia total da reação:

$$E = PCI \times F_c \times M_t \quad (2)$$

Onde:

E: Energia total da reação [MJ]

PCI: Poder calorífico inferior [46 MJ/kg] (Despacho n.º 2074/2009)

Fc: Fração de massa confinada [-]

Mt: Massa total [kg]

Então:

$$E = 46MJ/kg \times 0,5 \times 13kg \leftrightarrow E = 299MJ$$

De seguida é necessário calcular uma distância R' que se traduz numa escala de energia, onde através dos gráficos dos Anexos C, D e E podemos retirar o valor adimensional para a sobrepressão (P_s'), pico da pressão dinâmica (P_{dyn}') e duração da fase positiva (t_p').

Sendo assim R' :

$$R' = \frac{R}{\left(\frac{E}{P_a}\right)^{1/3}} \quad (3)$$

Onde:

R' : Escala de distância R' [–]

R : Distância a que ocorre a fuga de gás [m]

E : Energia total da reação [J]

P_a : Pressão atmosférica [Pa]

Então:

$$R' = \frac{50 \text{ m}}{\left(\frac{2,99 \times 10^8 \text{ J}}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}}\right)^{1/3}} \Leftrightarrow R' \sim 3,5$$

Para calcular pico de sobrepressão (P_s):

Com $R' = 3,5$ retiramos do Anexo C o valor de $P_s' = 0,035$

$$P_s = P_s' \times P_a \quad (4)$$

Onde:

P_s : Pico de sobrepressão [Pa]

P_s' : Sobrepressão [–]

P_a : Pressão atmosférica [Pa]

Então:

$$P_s = 0,035 \times 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} \Leftrightarrow P_s = 3545,5 \text{ Pa}$$

Para calcular pico da pressão dinâmica (P_{dyn}):

Com $R' = 3,5$ retiramos do Anexo D o valor de $P_{dyn}' = 0,001$

$$P_{dyn} = P_{dyn}' \times P_a \quad (5)$$

Onde:

P_{dyn} : Pico de pressão dinâmica [Pa]

P_{dyn}' : Pico de pressão dinâmica em função de R' [-]

P_a : Pressão atmosférica [Pa]

Então:

$$P_{dyn} = 0,001 \times 1,013 \times 10^5 Pa \Leftrightarrow P_{dyn} = 101,3 Pa$$

Para calcular a duração da fase positiva (t_p):

Com $R' = 3,5$ retiramos do Anexo E o valor de $t_p' = 0,7$

$$t_p = t_p' \times \frac{\left(\frac{E}{P_a}\right)^{1/3}}{a_a} \quad (6)$$

Onde:

t_p : Duração da fase positiva [s]

t_p' : Duração da fase positiva em função de R' [-]

E : Energia total da reação [J]

P_a : Pressão atmosférica [Pa]

a_a : Velocidade do som no ar [m/s]

Então:

$$t_p = 0,7 \times \frac{\left(\frac{2,99 \times 10^8 J}{1,013 \times 10^5 Pa}\right)^{1/3}}{340 m/s} \Leftrightarrow t_p = 0,0295 s$$

Para calcular a pressão de impulso (i_s):

$$i_s = \frac{P_s \times t_p}{2} \quad (7)$$

Onde:

i_s : Pressão de impulso [Pa · s]
 P_s : Pico de sobrepressão [Pa]
 t_p : Duração da fase positiva [s]

Então:

$$i_s = \frac{3545,5 \text{ Pa} \times 0,0295}{2} \Leftrightarrow i_s = 52,296 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Para calcular a distância (R) correspondente ao limite de sobrepressão imposto:

Sabemos que $P_s = 60 \text{ mbar} = 6000 \text{ Pa}$

Usando a fórmula (4) retiramos:

$$P_s' = \frac{6000 \text{ Pa}}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}} \Leftrightarrow P_s' = 0,06$$

Observando o Anexo C retiramos um valor para $R'=2$, o qual substituído na fórmula (3):

$$R = \left(\frac{2,99 \times 10^8 \text{ J}}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}} \right)^{\frac{1}{3}} \times 2 \Leftrightarrow R \sim 28,7 \text{ m}$$

Para o mesmo cenário, efetuou-se a simulação com o programa EFFECTS 9®. Os resultados são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos e exportados, do programa Effects 9®, referentes ao modelo Multi-Energy.

Parameters	
Inputs	
Chemical name	PROPANE (YAWS)
Ambient pressure (Pa)	1,013E05
Total mass in explosive range (kg)	13
Fraction of flammable cloud confined (-)	0,5
Curve number	5 (Medium deflagration)
Distance from release (Xd) (m)	50
Offset between release point and cloud centre (m)	1

Threshold overpressure (mbar)	60
Results	
Confined mass in explosive range (kg)	6,5
Total combustion energy (MJ)	299,08
Peak overpressure at Xd (Pa)	3514,1
Peak dynamic pressure at Xd (Pa)	101,3
Pressure impulse at Xd (Pa*s)	53,155
Positive phase duration at Xd (s)	0,030252
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	29,322
Blast-wave shape at Xd	Pressure wave
Damage (general description) at Xd	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).
Damage to brick houses at Xd	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).
Damage to typical American-style houses at Xd	No damage or very minor damage
Damage to structures (empirical) at Xd	No damage or very minor damage

Com os resultados obtidos através de ambas as formas de cálculo será posteriormente, capítulo seguinte, realizada uma análise comparativa.

3.2.2. Método TNT Equivalency

O método TNT Equivalency foi concebido para estimar os possíveis efeitos dos danos causados pela explosão de uma determinada quantidade de combustível. É simples de se utilizar: a energia de combustão disponível em nuvens de vapor é convertida numa massa equivalente de TNT com a seguinte fórmula (Crowl, 2002):

$$Q_{TNT} = \alpha_e \times \frac{Q_f \times E_{mf}}{E_{mTNT}}$$

O valor típico para a energia de explosão do TNT é de 1120 cal/g = 4686 kJ/kg. Este método baseia-se numa curva de sobrepressão que se aplica a explosões para TNT. As explosões de nuvens de vapor (VCE), utilizadas para a aplicação do método anterior, são explosões que ocorrem por libertação de vapor inflamável sobre um grande volume, onde são mais frequentes deflagrações. Este método é incapaz de considerar os efeitos de aceleração da velocidade da frente de chama resultante do confinamento, ao contrário do Multi-Energy (Crowl, 2002).

A principal vantagem na utilização deste método é a sua simplicidade na conversão das variáveis utilizadas para medidas específicas.

Tabela 3.3 - Dados para aplicação do modelo TNT Equivalency.

Tipo de modelo de TNT	Com base em energia
Nome da substância	Propano
Massa total da matéria inflamável [kg]	13
Fator de equivalência [-]	0,1
Fração de matéria inflamável confinada [-]	0,5
Distância a que ocorre a fuga [m]	10
Distância entre o ponto da fuga e o centro da nuvem [m]	1
Limite de sobrepressão [mbar]	2026,5

Efetuuou-se o cálculo manual do método TNT Equivalency tendo em conta os dados da tabela anterior:

Massa TNT equivalente:

$$Q_{TNT} = \alpha_e \times \frac{Q_f \times E_{mf}}{E_{mTNT}} \quad (8)$$

Onde:

Q_{TNT} : Massa TNT equivalente [kg]

α_e : TNT equivalente com base na energia [-]

Q_f : Massa do combustível envolvido [kg]

E_{mf} : Energia de combustão do combustível por unidade de massa [46 × 10⁶ J/kg] (Despacho n.º 2074/2009)

E_{mTNT} : Energia de combustão do TNT por unidade de massa [465 × 10⁴ J/kg] (Yellow Book)

Então:

$$Q_{TNT} = 0,1 \times \frac{(13 \times 0,5) \times 46 \times 10^6}{465 \times 10^4} \Leftrightarrow Q_{TNT} = 6,43 \text{ kg}$$

Pico de sobrepressão (P_s) a 10m:

É necessário calcular R':

$$R' = \frac{R}{(Q_{TNT})^{1/3}} \quad (9)$$

Onde:

R' : Escala de distância R' [m/kg^{1/3}]

R: Distância a que ocorre a fuga [m]

Q_{TNT}: Massa TNT equivalente [kg]

Então:

$$R' = \frac{10}{(6,43)^{1/3}} \Leftrightarrow R' = 5,38 \text{ m/kg}^{1/3}$$

Com o valor de R', consultando o Anexo F, retiramos o valor de pico de sobrepressão (P_s)
~ 50 kPa = 500 mbar

Para calcular a distância (R) correspondente ao limite de sobrepressão:

Visualizando o Anexo F com P_s=202,65 kPa (=2026,5 mbar) retiramos o valor de 2,4
m/kg^{1/3} para R'.

Utilizando a fórmula (9):

$$R = (6,43)^{1/3} \times 2,4 \Leftrightarrow R \sim 4,46 \text{ m}$$

Com os mesmos dados utilizados no cálculo manual procedeu-se à simulação a partir do
programa, cujos resultados se encontram na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resultados obtidos e exportados, do programa Effects 9®, referentes ao modelo TNT
Equivalency.

Parameters	
Inputs	
Type of TNT model	Based upon energy
Chemical name	PROPANE (YAWS)
Total mass in explosive range (kg)	13
Equivalency factor (-)	0,1
Fraction of flammable cloud confined (-)	0,5

Distance from release (Xd) (m)	10
Offset between release point and cloud centre (m)	1
Threshold overpressure (mbar)	2026,5
Results	
Peak overpressure at Xd (mbar)	512,42
Equivalent TNT mass (kg)	6,7666
Damage (general description) at Xd	Heavy damage (Zone B: 35 - 83 kPa).
Damage to brick houses at Xd	The damage is not repairable; 50% to 75% of the outer brick walls are lightly to heavily damaged. The remaining brick walls are unreliable (35 kPa).
Damage to structures (empirical) at Xd	Brickstone walls (20-30 cm) have collapsed (50 kPa). Displacement of a cylindrical storage tank, failure of connecting pipes (50-100 kPa). Loaded train carriages turned over (50 kPa). Collapse of a pipe-bridge (40-55 kPa). Displacement of a pipe-bridge, rupture of piping (35-40 kPa). Damage to a fractioning column (35-80 kPa). Plating of cars and trucks pressed inwards (35 kPa). Breakage of wooden telephone poles (35 kPa). Cladding of light industry building ripped-off (30 kPa). Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).
Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)	100
Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)	100
Confined mass in explosive range (kg)	6,5
Dist. center mass of confined expl. cloud to study point (m)	9
Dist. center mass of cloud at threshold overpressure (m)	4,451

No capítulo seguinte, serão discutidos os resultados obtidos de ambas as formas de cálculo.

3.2.3. BLEVE Static Model

BLEVE, conhecido como a explosão de um reservatório contendo um líquido inflamável, decorrente do aumento de pressão interna associada à ebulição do líquido, por efeito do aumento de temperatura do reservatório, provocado pelo calor gerado por incêndio no exterior (Crowl, 2002).

O BLEVE caracteriza-se pela vaporização quase instantânea de uma fração significativa do conteúdo no reservatório, que pode ser seguido por uma combustão ou explosão no caso de esse conteúdo ser inflamável. Este tipo de acidentes pode ocorrer por diversos meios, podendo ser por defeitos de material dos reservatórios ou por causas de fogo externo em redor do depósito. Com as temperaturas altas em redor do reservatório, o conteúdo aquece, a pressão de vapor aumenta e a integridade do depósito fica reduzida. Nesse momento dá-se a rutura do reservatório e todo o líquido nele contido volatiliza de forma explosiva. Essa vaporização instantânea causa uma onda de choque, assim como projeções de fragmentos do reservatório, seguido por uma “fire ball” (“Yellow Book”, 2005).

No caso de os reservatórios conterem materiais inflamáveis pode-se originar explosões por nuvens de vapor, também conhecidas por VCE. No caso de os reservatórios conterem materiais tóxicos, aquando a sua fuga uma grande aérea pode ficar contaminada. No entanto, é importante não esquecer que mesmo que os reservatórios não contenham materiais consideravelmente perigosos, só o facto de estes sofrerem uma sobrepressão, uma libertação excessiva de energia, pode sempre causar danos em seu redor (“Yellow Book”, 2005).

Tabela 3.5 - Dados para aplicação do modelo BLEVE Static Model.

Dados para aplicação do modelo	
Nome da substância	Propano
Massa total de matéria inflamável [kg]	1000
Temperatura inicial no reservatório [K]	293,15
Distância a que ocorre a fuga [m]	60
Altura do recetor [m]	1,5

Através dos dados da Tabela 3.5, realizou-se o cálculo manual para o método BLEVE:

A figura 3.8 permite perceber as distâncias da fire ball em relação ao solo e objeto que vão ser a seguir calculadas.

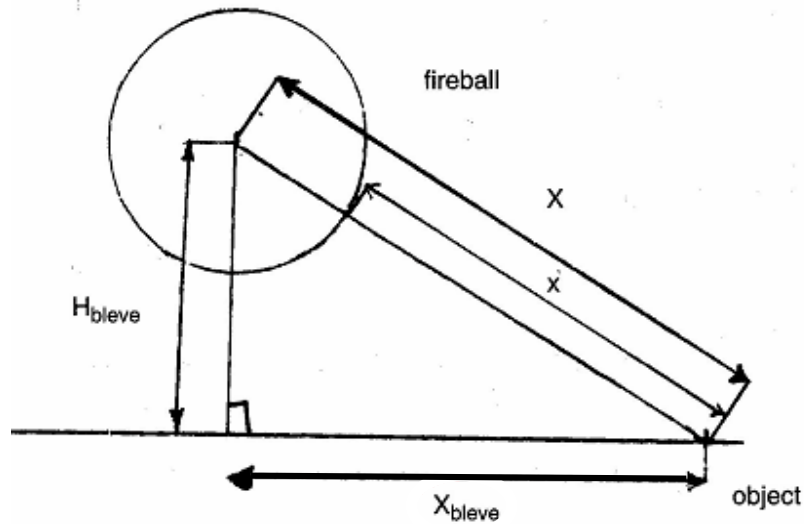


Figura 3.8 - Distâncias em relação à fire ball (“Yellow Book”, 2005).

Raio da fire ball

$$r_{fb} = c_9 \times m^{0,325} \quad (10)$$

Onde:

r_{fb} : Raio da fire ball [m]

c_9 : Constante = 3,24 [m/kg^{0,325}] (Yellow Book)

m : Massa total da matéria inflamável [m]

Então:

$$r_{fb} = 3,24 \times 1000^{0,325} \Leftrightarrow r_{fb} = 30,59 \text{ m}$$

Duração da fire ball:

$$t = c_{10} \times m^{0,26} \quad (11)$$

Onde:

t : Duração da fire ball [s]

c_{10} : Constante = 0,852 [s/kg^{0,26}] (Yellow Book)

m : Massa total da matéria inflamável [m]

Então:

$$t = 0,852 \times 1000^{0,26} \Leftrightarrow t = 5,13 \text{ s}$$

Altura da fire ball:

$$H_{bleve} = 2 \times r_{fb} \quad (12)$$

Onde:

H_{bleve} : Altura do centro da fire ball em relação ao solo [m]

r_{fb} : Raio da fire ball [m]

Então:

$$H_{bleve} = 2 \times 30,59 \Leftrightarrow H_{bleve} = 61,8 \text{ m}$$

Distância do centro da fire ball ao objeto:

$$X = (X_{bleve}^2 + H_{bleve}^2)^{1/2} \quad (13)$$

Onde:

X : Distância do centro da fire ball ao objeto [m]

X_{bleve}^2 : Distância do centro da fire ball ao objeto, medição no solo [m]

H_{bleve}^2 : Altura do centro da fire ball em relação ao solo [m]:

Então:

$$X = (60^2 + 61,8^2)^{1/2} \Leftrightarrow X = 86,14 \text{ m}$$

Valor máximo do fator de forma:

$$F_{view} = (r_{fb}/X)^2 \quad (14)$$

Onde:

F_{view} : Fator de forma da fire ball [–]

r_{fb} : Raio da fire ball [m]

X : Distância do centro da fire ball ao objeto [m]

Então:

$$F_{view} = (30,59/86,14)^2 \Leftrightarrow F_{view} = 0,126$$

Fração do calor irradiado pela fire ball:

$$F_s = c_6 \times (P_{sv})^{0,32} \quad (15)$$

Onde:

F_s : Fracção do calor irradiado pela fire ball [–]

c_6 : Constante = $0,00325 \text{ (N/m}^2\text{)}^{0,32}$ (Yellow Book)

P_{sv} : Pressão de vapor do material inflamável [N/m^2]

Então:

$$F_s = 0,00325 \times (8,5 \times 10^5)^{0,32} \Leftrightarrow F_s = 0,257$$

Calor disponível para radiação:

$$\Delta H = \Delta H_c - \Delta H_v - C_p \times \Delta T \quad (16)$$

Onde:

ΔH : Calor disponível para radiação [J/kg] (engineeringtoolbox)

ΔH_c : Calor de combustão do material no seu ponto de ebulição [J/kg] (engineeringtoolbox)

ΔH_v : Calor de vaporização do material no seu ponto de ebulição [J/kg] (engineeringtoolbox)

C_p : Capacidade calorífica do material a pressão constante [J/(kg. K)] (engineeringtoolbox)

ΔT : Diferença de temperatura entre a chama e temperatura ambiente = 1700 [K] (valor recomendado pelo Yellow Book)

Então:

$$\Delta H = 50,34 \times 10^6 - 428000 - 1630 \times 1700 \Leftrightarrow \Delta H = 47141000 \text{ J/kg}$$

Superfície do poder emissivo

$$SEP_{act} = \Delta H \times m \times F_s / (4 \times \pi \times r_{fb}^2 \times t) \quad (17)$$

Onde:

SEP_{act} : Atual superfície do poder emissivo [J/(m².s)]

ΔH : Calor disponível para radiação [J/kg]

m: Massa do material [m]

F_s : Fracção do calor irradiado pela fire ball [-]

r_{fb} : Raio da fire ball [m]

t: Duração da fire ball [s]

Então:

$$SEP_{act} = 47141000 \times 1000 \times 0,257 / (4 \times \pi \times 30,59^2 \times 5,13) \Leftrightarrow SEP_{act} \\ = 200838 \text{ J}/(m^2 \cdot s)$$

Distância da área de superfície da chama para o objeto:

$$x = X - r_{fb} \quad (18)$$

Onde:

x: Distância da área de superfície da chama para o objeto

X: Distância do centro da fire ball ao objeto [m]

r_{fb} : Raio da fire ball [m]

Então:

$$x = 86,14 - 30,59 \Leftrightarrow x = 55,55 \text{ m}$$

Fator de absorção (para vapor de água):

$$\alpha_w = \varepsilon_w \times (T_a/T_f)^{0,45} \quad (19)$$

Onde:

α_w : Fator de absorção (para vapor de água)[-]

ε_w : Fator de emissão (para vapor de água) = 0,5[-] (Staley e Jurica, 1970)

T_a : Temperatura ambiente [K]

T_f : Temperatura final = 1200 [K](valor recomendado pelo Yellow Book)

Então:

$$\alpha_w = 0,5 \times (293,15/1200)^{0,45} \Leftrightarrow \alpha_w = 0,27$$

Assumindo a temperatura final de 1200 K e com o valor de α_w igual a 0,27 é possível retirar o valor de 10^5 N/m do Anexo G. Este valor corresponde a $P_w \cdot X$.

Onde:

P_w : Pressão de vapor parcial da água [N/m²]
X: Distância do centro da fire ball ao objeto [m]

Sendo:

$$P_w = \frac{10^5}{86,14} \Leftrightarrow P_w = 1160,9 \text{ N/m}^2$$

Transmissividade atmosférica:

$$\tau_a = c_7 \times (P_w \times X)^{-0,09} \quad (20)$$

Onde:

τ_a : Transmissividade atmosférica [-]
 c_7 : Constante = 2,02 [(N/m²)^{0,09} · m^{0,09}] (Yellow Book)
 P_w : Pressão de vapor parcial da água [N/m²]
X: Distância do centro da fire ball ao objeto [m]

Então:

$$\tau_a = 2,02 \times (1160,9 \times 86,14)^{-0,09} \Leftrightarrow \tau_a = 0,72$$

Fluxo de calor a partir do centro da fire ball:

$$q'' = SEP_{act} \times F_{view} \times \tau_a \quad (21)$$

Onde:

q'' : Fluxo de calor a partir do centro da fire ball [J/m² · s]
 SEP_{act} : Actual superfície do poder emissivo [J/m² · s]
 F_{view} : Fator de vista da fire ball [-]
 τ_a : Transmissividade atmosférica

Então:

$$q'' = 200838 \times 0,126 \times 0,72 \Leftrightarrow q'' = 18220,02 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}$$

Recorrendo aos dados utilizados para o cálculo manual, efetuou-se a simulação do mesmo método através do programa. Os resultados são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 3.6 - Resultados obtidos e exportados, do programa Effects 9®, referentes ao modelo BLEVE.

Parameters	
Inputs	
Chemical name	PROPANE (YAWS)
Total mass in vessel (kg)	1000
Initial temperature in vessel (K)	293,15
Distance from centre of vessel (Xd) (m)	60
Height of the receiver (m)	1,5
Calculate contours for	1st degree burns
Heat radiation level (lowest) for first contour plot (kW/m ²)	
Heat radiation level for second contour plot (kW/m ²)	
Heat radiation level (highest) for third contour plot (kW/m ²)	
Results	
Duration of the Fire Ball (s)	5,1338
Max Diameter of the Fire Ball (m)	61,175
Max Height of the Fire Ball (m)	61,175
Surface emissive power (max) (kW/m ²)	246,61
1% First degree burns distance (m)	109,12
1% Second degree burns distance (m)	
1% Third degree (Lethal) burns distance (m)	
(Max) heat radiation level at Xd (kW/m ²)	25,447
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0,13065
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	78,979
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m ²) ^{4/3})	384,26
Percentage first degree burns at Xd (%)	82,56
Percentage second degree burns at Xd (%)	
Percentage third degree burns at Xd (%)	

Assim como nos métodos anteriores, no capítulo seguinte será feita uma análise comparativa entre as duas formas de cálculo do método BLEVE.

De forma a perceber a que nível as variáveis de entrada influenciam os resultados no mesmo modelo, e a facilidade do programa na comparação desses mesmos resultados, elaborou-se várias simulações para os 3 modelos. Nestas simulações foram alteradas, aleatoriamente ou de forma percentual, diferentes variáveis para cada modelo (Apêndice A). A análise desses resultados será igualmente comentada no capítulo seguinte.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo é realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos com base nas duas formas de cálculo, manual e simulação através do programa EFFECTS 9®, para os três casos utilizados no capítulo anterior. Pretende-se com esta análise verificar a viabilidade do programa quando comparado com outras formas de cálculo.

Na Tabela 4.1, são apresentados os resultados obtidos para o método Multi-Energy através das duas formas de cálculo.

Tabela 4.1 - Comparação de resultados para o modelo Multi-Energy.

	Multi-Energy	
	Cálculo Manual	Simulação EFFECTS 9®
Massa de propano confinada [kg]	6,5	6,5
Energia total de combustão [MJ]	299	299,08
Pico de sobrepressão [Pa]	3545,5	3514,1
Pico de pressão dinâmica [Pa]	101,3	101,3
Duração da fase positiva [s]	0,0295	0,0303
Pressão do impulso [Pa*s]	52,296	53,155
Distância para o pico de sobrepressão (imposto) [m]	28,7	29,322

Pode-se verificar que de uma forma geral, os resultados são semelhantes nos dois tipos de cálculo. As diferenças existentes são pouco significativas, possivelmente podem advir de erros de leitura dos gráficos, no cálculo manual, a que a resolução por este método implica.

Quanto à análise de resultados obtidos através do programa para este método, verifica-se para o cenário de acidente estudado, que em termos de danos gerais estes são considerados menores (Zona D – pressão 3,5-17 kPa); em termos de danos em habitações estes foram classificados também como menores, sendo apenas necessários pequenos reparos reconstrutivos; em termos de infraestruturas não ocorre qualquer tipo de dano (Tabela 3.2).

Quanto ao método TNT Equivalency, a comparação dos resultados pode ser analisada na tabela seguinte.

Tabela 4.2 - Comparação de resultados para o modelo TNT Equivalency.

TNT Equivalency		
	Cálculo Manual	Simulação Effects 9®
Massa TNT equivalente [kg]	6,43	6,77
Pico de sobrepressão [Pa]	50000	51242
Distância para o pico de sobrepressão (imposto) [m]	4,46	4,45

Com base na base na Tabela 4.2, verifica-se que em ambos os cálculos os resultados obtidos são similares. A variação na massa TNT equivalente poderá estar relacionada com a diferença no valor da energia de combustão do combustível. Quanto aos resultados do pico de sobrepressão, estes diferem provavelmente por erros de leitura no gráfico que este método requer.

Na análise dos resultados apresentados pelo programa foi possível verificar que em termos de danos gerais estes foram considerados de nível grave (Zona B – pressão 35-83 kPa), tendo este cenário um pico de sobrepressão de 51 kPa; em termos de danos nas habitações estes revelaram ser irreparáveis, 50% a 75% das paredes exteriores são afetadas e as restantes ficam instáveis; em termos de danos em infraestruturas, o programa considera como exemplos de danos a rutura de tubagens, desabamento de estruturas industriais em aço, queda de árvores (Tabela 3.4).

Para o método BLEVE, os resultados obtidos em ambos os cálculos são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 4.3 - Comparação de resultados para o modelo BLEVE Static.

BLEVE		
	Cálculo Manual	Simulação Effects 9®
Diâmetro fire ball [m]	61,18	61,18
Duração da fire ball [s]	5,13	5,13
Fator de vista [-]	0,126	0,131
Transmissividade da atmosfera [-]	0,72	0,79
Superfície do poder emissivo [kW/m²]	201	247
Fluxo de calor [kW/m²]	18,22	25,45

A análise da Tabela 4.3 permite verificar que os resultados obtidos no cálculo manual e na simulação são semelhantes. Existe apenas uma diferença significativa nos valores referentes à superfície do poder emissivo, que por sua vez se reflete na diferença verificada nos valores do fluxo de calor, pois este é calculado com base no valor da superfície do poder emissivo. As diferenças deste último valor poderão estar relacionadas com as diferentes aproximações assumidas para os valores do calor de combustão e calor de vaporização do material no seu ponto de ebulição, assim como o valor da capacidade calorífica do material.

Para o cenário estudado, o programa revelou a ocorrência de queimaduras de 1º grau a 109 metros de distância do centro da explosão (Tabela 3.6).

De uma forma geral, o programa EFFECTS 9® mostrou ser uma ferramenta suficientemente rigorosa e viável quando comparado com o cálculo manual, constituindo uma alternativa mais simples e rápida para os cálculos dos modelos estudados.

De modo a efetuar uma análise de sensibilidade para os cenários e modelos estudados foram modificadas algumas das variáveis para se perceber a sua influência comparativamente aos resultados base, anteriormente analisados.

Para o modelo Multi-Energy fez-se um estudo baseado na variação da distância onde ocorre a fuga de propano, de 20% e de 50% acima do valor base (50 metros) (Apêndice A-I), observando-se diferenças no grau dos danos causados. Enquanto no cenário base ocorrem danos gerais (Zona D – pressão 3,5-17 kPa), para as duas variações de distância a pressão cai para valores inferiores a 3,5 kPa não ocorrendo quaisquer danos gerais. Quanto aos danos em habitações todos os cenários revelaram necessidade de intervenção reconstrutiva. Em nenhum dos cenários se verificaram danos em estruturas.

Foi também estudada a influência da variação na massa, para 30 kg e 50 kg, tendo sido o cenário base de 13 kg (Apêndice A-II). Não se verificou qualquer alteração em termos de variação dos danos, devido ao facto dos resultados serem definidos consoante o intervalo de pressão em que se encontram, que nesta situação coincidiram no mesmo intervalo. Analisou-se, igualmente, a variável das curvas de explosão (Apêndice A-III), verificando-se que estas influenciam significativamente os resultados, por exemplo, a 10 metros do centro da explosão para uma curva de nível 4 (deflagração fraca) obteve-se um valor de sobrepressão

de 90 mbar, enquanto que para uma curva de nível de 5 (deflagração média) e uma curva de nível 6 (deflagração forte) os valores de sobrepressão foram 170 e 450 mbar, respetivamente.

No modelo TNT Equivalency foram realizadas as mesmas alterações: distância da libertação onde ocorre a fuga e massa de combustível. Nestas comparações, os resultados indicam que não existem diferenças em relação aos danos gerais entre o cenário base (10 metros) e a variação da distância em 20% (12 metros), sendo classificados como danos graves (Zona B – pressão 35-83 kPa), enquanto que com uma variação de 50% (15 metros) são considerados danos moderados (Zona C – pressão 17-35 kPa). Quanto aos danos em habitações, entre o cenário base e a variação de 20% não existem diferenças (danos irreparáveis), enquanto que numa variação de 50% as habitações necessitariam de ser reconstruídas (Apêndice A-IV). No que diz respeito às variações da massa de combustível foi possível concluir, através dos resultados obtidos (Apêndice A-V) para danos gerais, que houve alteração da zona de dano com a mudança do cenário base para os correspondentes às variações. Apesar da diferença do pico de sobrepressão na variação para 30 kg e 50 kg ser significativa, uma vez que com 30 kg de massa de combustível se atinge zona de dano A (destruição total – pressão superior a 83 kPa), qualquer outro aumento da massa irá conduzir um resultado na mesma zona de dano. Quanto aos danos em habitações, as duas variações voltam a apresentar resultados iguais uma vez que a pressão é superior a 70 kPa, o que se reflete em cerca de 75% do colapso das paredes. Tanto o cenário de 30 kg como o de 13 kg apresentam os mesmos danos em estruturas, sendo a única diferença para o cenário de 50 kg dada pelo colapso numa estrutura de suporte de tanque de armazenamento.

Por último, no modelo do BLEVE a variação da distância em que ocorre a explosão (Apêndice A-VI) reflete-se numa acentuada descida na percentagem de queimaduras de 1º grau com: 83% para cenário base (60 metros), 54% para variação para 72 metros e 13% para 90 metros. Entre o cenário base e a variação de 50% (90 metros) podemos verificar uma diferença de 70 pontos percentuais, refletindo assim a importância que a distância ao centro da explosão tem nos resultados. Na variação da massa de combustível (Apêndice A-VII), apesar de existirem alterações na percentagem de queimaduras de 1º grau, os resultados não são tão significativos. Podemos assim verificar, para este estudo, que a variação da distância, em termos de danos, tem um maior impacto do que a variação da massa de combustível.

5. CONCLUSÕES

Com a elaboração deste trabalho foi possível perceber o risco que as matérias perigosas representam nas unidades industriais e na sua vizinhança. A sua utilização nos processos industriais pode conduzir a diferentes acidentes nos quais o homem e o ambiente são os principais afetados. Nesse sentido, é importante uma análise dessas substâncias por parte das empresas/fábricas com a adoção de meios e medidas de segurança/prevenção, com base nas leis e normas regulamentadas pela União Europeia e pelo governo português. Foram identificados alguns dos acidentes industriais históricos mais relevantes, permitindo ter uma percepção da gravidade que estes podem causar. As diretivas europeias e os decretos-lei têm contribuído para a melhoria nas medidas de prevenção/mitigação a adotar pelas unidades industriais. A análise de risco imposta por muitos dos regulamentos é essencial para uma avaliação adequada e uma melhor aplicação das medidas de prevenção preconizadas.

Os estudos de investigação, que têm vindo a ser desenvolvidos ao longo dos anos sobre os efeitos de reações inadvertidas de matérias perigosas, com a combinação de estudos experimentais e de simulação têm permitido efetuar uma avaliação mais rigorosa do tipo de acidentes que podem ocorrer durante o armazenamento e transporte com matérias perigosas. Com base nessas investigações percebeu-se a necessidade de melhorar as tomadas de decisão em relação aos riscos que advêm desses acidentes, daí que tem vindo a ser crescente o desenvolvimento de programas de simulação que permitam com maior rapidez e, em princípio, menor custo a obtenção de dados e conclusões. Nesse sentido, no presente trabalho foram identificados alguns programas de simulação comercializados e caracterizados em termos de potencialidades/fraquezas, complexidade na introdução/obtenção de dados e exploração dos resultados. Conclui-se que existem no mercado diversos programas, com diversas funcionalidades, que recorrem a diferentes métodos de simulação e com custos variados, tendo alguns licenças periodicamente gratuitas. Tendo sido utilizado o programa EFFECTS 9® como ferramenta neste estudo, este revelou ser um programa bastante completo, apresentando uma vasta base de dados e com diversas opções. É um programa

intuitivo no que diz respeito ao seu manuseamento, na introdução das variáveis para simulação de acidentes e na forma de apresentação dos resultados, através de gráficos, texto simples ou relatórios.

Para uma melhor compreensão quanto aos modelos de simulação de acidentes, neste trabalho foram utilizados o Multi-Energy, TNT Equivalency e BLEVE, e a análise não se cingiu apenas aos resultados obtidos pelo programa, tendo sido calculados os mesmos cenários de acidentes por cálculo manual. Com os resultados obtidos pelos dois processos foi possível concluir que estes apresentavam grandes semelhanças, o que mostra a fiabilidade do programa. Como no EFFECTS os gráficos são convertidos em funções matemáticas haverá um menor erro associado quando comparado à análise visual de gráficos de escala logarítmica pelo cálculo manual (necessários para resolução de alguns dos métodos). Pois, na observação visual dos gráficos para um mesmo ponto pode-se fazer duas leituras diferentes. De forma a perceber como as variáveis de entrada podiam influenciar os resultados dos modelos, foram realizadas algumas variações e comparadas com o cenário base estudado, concluindo que, por exemplo, no Multi-Energy a variável que mais influencia os resultados é a escolha da curva de nível de explosão e no BLEVE a variação da distância ao centro da explosão é a que tem uma maior influência nos resultados quando comparada à variação da massa de combustível (para os cenários e variações estudadas). Quanto aos danos resultantes dos diferentes cenários de acidentes gerados pelo programa são distinguidos: danos gerais, danos em habitações, danos em estruturas e danos em humanos. Estes danos são definidos com base empírica e muitos deles situados em intervalos de sobrepressão com valores bastante diferenciados, isto é, para um mesmo dano corresponde um amplo intervalo de sobrepressão.

Com este trabalho mostrou-se que existe um número razoável de programas de simulação que podem ser usados como ferramenta na análise de riscos nas unidades industriais em que existe matérias perigosas. A certificação de alguns destes programas e o reconhecimento da validade dos resultados pelas entidades governamentais/responsáveis poderá abrir perspectivas a uma maior utilização deste tipo de ferramenta e ao aperfeiçoamento e aferição da fiabilidade da mesma, para a adoção e validação de medidas de prevenção e mitigação dos acidentes.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

A simulação de cenários de acidentes com matérias perigosas através do programa EFFECTS 9® deverá ser analisada em toda as suas opções, de modo a analisar as potencialidades dos outros modelos disponibilizados. A ferramenta específica que inclui a simulação de danos, deverá ser explorada de forma a perceber como os resultados são gerados e compará-los com cenários reais, que possam ser usados na simulação. Esta comparação constitui um desafio, pois uma das limitações na elaboração deste trabalho foi a obtenção de dados reais sobre acidentes com materiais perigosos e os seus efeitos, que pudessem ser usados neste estudo, para aferir da fiabilidade dos modelos representativos. A análise de sensibilidade deveria ser estendida a mais variáveis, constituintes dos modelos e cenários, procurando a construção de um quadro indicativo das variáveis que mais carecem de precisão, por serem as mais influentes nos resultados. De modo a analisar a necessidade de rever as medidas de prevenção e mitigação existentes em Portugal em unidades industriais onde existem grandes quantidades de matérias perigosas dever-se-á simular possíveis cenários de acidente e avaliar se os danos causados estariam dentro do quadro sobre o qual obtiveram o licenciamento e que são garantia de segurança para trabalhadores, vizinhança e meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANPC (Consultado em Março de 2014) www.proteccaocivil.pt. Autoridade Nacional de Protecção Civil.

APA (Consultado em Março de 2014), www.apambiente.pt. Associação Portuguesa do Ambiente.

Araújo, Giovanni. (2005), “Segurança na Armazenagem, Manuseio e Transporte de Produtos Perigosos”. Rio de Janeiro, Brasil.

Barthelemy, F., Hornus, H., Hufschmitt, J., Raffoux, J. e Roussot, J (2001), “Accident on the 21st of September 2001 at a factory belonging to the Grand Paroisse Company in Toulouse - Report of the General Inspectorate for the Environment”. R IGE/01/034, França.

Bellasio R. e Blanconi, R. (2003), “On line simulation system for industrial accidents”. *Environmental Modelling & Software*, (2), pp. 329-342.

Bjerketvedt, D., Bakke, J. e Wingerden, K. (1997), “Gas explosion Handbook”. *Journal of Hazardous Materials*, (52), Issue 1, pp. 1-150.

Centemeri, Laura (2010), “Seveso: o desastre e a Directiva”. *Laboral*, Issue 10 (2), pp. 66-70. Porto: Universidade do Porto.

Christou, M., Amendola, A. e Smeder, M. (1999), “The control of major accident hazards: The land-use planning issue”. *Journal of Hazardous Materials*, Issue 65, pp. 151-178.

Comunidade Europeia (1994), “Directive 94/9/CE of the European Parliament and the council”. *Official Journal of the European Communities*, No L 100/1.

Crowl, Daniel (2002), “Chemical Process Safety Fundamentals with Applications”. Prentice Hall International Series.

Decreto-lei n.º 139/2002 de 17 de Maio, “Diário da República – I Série-A, N.º 114”. Ministério da Administração Interna.

Decreto-lei n.º 164/96 (alterado em 2001) de 23 de Maio, “Diário da República – I Série-A, N.º 119”. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa.

Decreto-lei n.º 254/2007 de 12 de Julho, “Diário da República, 1ª Série – N.º 133”. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa.

Decreto-lei n.º 41-A/2010 de 29 de Abril, “Diário da República, 1ª Série – N.º 83”. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa.

Despacho n.º 2074/2009 de 15 de Janeiro, “Diário da República, 2.ª série — N.º 10”
Autoridade Nacional de Proteção Civil,

Dupuy, Jean-Pierre (2007), “A catástrofe de Chernobyl vinte anos depois”. Estudos Avançados, 21 (59), pp. 243-252. São Paulo: Universidade de São Paulo.

EFFECTS “User and reference manual - Version 9 (2012)”, TNO Built Environment & Geosciences, Department Urban Environment and Safety.

Engineeringtoolbox (Consultado em Janeiro de 2015)
http://www.engineeringtoolbox.com/propane-d_1423.html.

EPA (Consultado em Março de 2014) www.epa.gov/. United States Environmental Protection Agency.

Fabiano, B., Currò, F., Reverberi, A., e Pastorino, R. (2005), “Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Issue 18, pp. 403-413.

Governo de Portugal (2008), “Guia de Inspeções Seveso”. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Greenpeace (2002), “Bhopal, Índia – O pior desastre químico da história (1984-2002)” [Online]. Disponível em: www.greenpeace.org.br/bhopal/docs/Bhopal_desastre_continua.pdf [Acedido a 26 Dezembro].

Grosh, Thomas e Tatom, Frank (2004), “Explosion modelling and damage assessment software”. Breeze Software and Data/Trinity Consultants.

Indusmelec (2014), “ATEX – Atmosferas Explosivas”. [Disponível online em: http://www.indusmelec.pt/newsletter/11/ATEX-Atmosferas_Explosivas.pdf]. Consultado a 24 de Janeiro de 2015.

Jo, Y. e Ahn, B. (2002), “Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Issue 15, pp. 179-188.

Khan, F. e Abbasi, S. (1999), “Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Issue 12, pp. 361-378.

Kirchsteiger, C. (1997), “Impact of accident precursors on risk estimates from accident Databases”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Volume 10, Issue 3, pp. 159- 167.

Lei de Bases da Proteção Civil (Lei n.º 113/91) de 29 de Agosto. “Diário da República – I Série-A, N.º 198”.

Lewis, S. (2008), “An Overview of Leading Software Tools for QRA”. 7th Professional Development Conference & Exhibition, March 18-22 of American Society of Safety Engineers, Bahrain.

Lohani, B., Evans, H., Ludwig, R., Everitt, C., Richard, A., Tu, S. (1997), “Environmental Impact Assessment for Developing Countries in Asia”.

Oggero, A. Darbra, R., Muñoz, M., Planas, E. e Casal, J. (2006), “A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail”. *Journal of Hazardous Materials*, Issue A133, pp. 1-7.

Staley, D. e Jurica, G. (1979), “Flux Emissivity Tables for Water Vapor, Carbon Dioxide and Ozone”. *Institute of Atmospheric Physics*. Tucson: The University of Arizona, pp. 365-372.

Papadakis, G. A. (1999), “Major Hazard pipelines: a comparative study of on-shore transmission accidents”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Issue 12, pp. 91-107.

Pascon, P. (1999), “FLIXBOROUGH – 25 Anos” [Online]. Disponível em: www.processos.eng.br/Portugues/PDFs/flixborough_25_anos.pdf [Acedido a 26 Dezembro].

PPRT. (2007), “Plan De Prévention Des Risques Technologiques – Guide Méthodologique. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable”. Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer.

Quaranta, N., DeMartini, A., Bellasio, R., Bianconi, R. e Marioni, M. (2002), “A decision support system for the simulation of industrial accidents”. *Environmental Modelling & Software*, Issue 17, pp. 497-504.

Reniers, G., Ale, B., Dullaert, W. e Foubert, B. (2006), “Decision support systems for major accident prevention in the chemical process industry: A developers' survey”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Issue 19, pp. 604-620.

Santos, Carlos (2001), “Contributos para a implementação da directiva ATEX. Estudo de caso no sector industrial”. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Porto.

Schenini, P., Neuenfeld, D. e Rosa, A. (2006), “O gerenciamento de riscos no transporte de produtos perigosos”. XIII SIMPEP, 6 a 8 Novembro de 2006, São Paulo, Brasil.

Smith, K. (2001), “Environmental Hazards - Assessing risk and reducing disaster”. Keith Smith.

Souza, F., Silva, C., Aguiar, L. e Almeida, J. (2011), “Proposta para utilização da simulação computacional em análise de risco, avaliação de desempenho e sistemas de gestão ambiental”. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, (2) Issue 2, pp- 39-63.

Ronza, A., Félez, S., Darbra, R., Carol, S., Vílchez, J. e Casal, J. (2003), “Predicting the frequency of accidents in port areas by developing event trees from historical analysis”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Issue 16, pp. 551-560.

Tixier, J., Dusserre, G., Rault-Doumax, S., Ollivier, J. e Bourely, C. (2002), “OSIRIS: software for the consequence evaluation of transportation of dangerous goods accidents”. *Environmental Modelling & Software* Issue 17, pp. 627-637.

TNO (The Netherlands Organization of Applied Scientific Research) (2005), “Methods for the calculation of Physical Effects [Yellow Book]”. Netherlands: R.A.P.M. Weterings.

TNO (Consultado em Março de 2014), www.tno.nl/index.cfm.

ANEXO A

Classificação e normas para atmosferas explosivas (ATEX) (Indusmelec, 2014).

Classificação de zonas e equipamentos

Grupos de equipamentos

A directiva divide os equipamentos em dois grupos. A fim de determinar a conformidade adequada, no processo de avaliação, o fabricante do equipamento define com base na utilização pretendida, a que grupo e categoria, esse produto pertence, de acordo com os requisitos estipulados.

Grupo I
Equipamentos destinados a utilização na parte subterrânea de minas, bem como às partes das instalações de superfície dessas minas, susceptíveis de perigo devido ao grisu (*mistura gasosa de metano e ar, que existe no interior das minas e que pode provocar explosões*) e/ou a poeiras inflamáveis.

Grupo II
Equipamentos destinados a utilização em locais susceptíveis de ocorrência de atmosferas explosivas.

Estes dois grupos, são por sua vez divididos em sub-categorias, conforme o quadro abaixo:

Nível de protecção	Grupo I Categorias	Grupo II Categorias	Nível de desempenho	Condições de funcionamento
Muito elevado	M1		Dois meios independentes de protecção, garantindo o nível de segurança, mesmo quando ocorrem duas falhas independentes uma da outra.	Equipamento permanece com energia e em funcionamento, mesmo na presença de atmosfera explosiva.
Muito elevado		1	Dois meios independentes de protecção, garantindo o nível de segurança, mesmo quando ocorrem duas falhas independentes uma da outra.	Equipamento permanece com energia e em funcionamento, em zonas 0,1,2 (Gases) e / ou 20, 21, 22 (Poeiras)
Elevado	M2		Adequado para funcionamento em condições normais e em condições de ambiente severas. Pode também ser utilizado, em locais onde ocorram perturbações com frequência, desde que as mesmas sejam tomadas em conta.	Equipamento fica sem energia se é detectada atmosfera explosiva.
Elevado		2	Adequado para funcionamento em condições normais. Pode também ser utilizado, em locais onde ocorram perturbações com frequência, desde que as mesmas sejam tomadas em conta.	Equipamento permanece com energia e em funcionamento em zonas 1, 2 (Gases) e/ou 21, 22 (Poeiras)
Normal		3	Adequado para funcionamento em condições normais.	Equipamento permanece com energia e em funcionamento em zonas 2 (Gases) e/ou 22 (Poeiras)

RISCO DE EXPLOÇÃO



Classificação das áreas de risco

As áreas perigosas são classificadas, em termos de zonas, em função da frequência e da duração da presença de uma atmosfera explosiva. As áreas são classificadas pela entidade empregadora, segundo o estipulado pela Directiva 1999/92/CE.

Zona 0	Zona 1	Zona 2	Zona 20	Zona 21	Zona 22
Local em que uma atmosfera explosiva é constituída por uma mistura com o ar, de substâncias inflamáveis sob a forma de gás, vapor ou névoa, presente de forma contínua, por longos períodos, ou frequentemente.	Local em que uma atmosfera explosiva é constituída por uma mistura com o ar, de substâncias inflamáveis, sob a forma de gás, vapor ou névoa, prováveis de ocorrer em condições de funcionamento normais ou, ocasionalmente.	Local em que uma atmosfera explosiva é constituída por uma mistura com o ar, de substâncias inflamáveis sob a forma de gás, vapor ou névoa, não são prováveis de ocorrer em condições de funcionamento normais, mas, caso aconteçam, apenas por um curto período.	Local em que uma atmosfera explosiva sob a forma de uma nuvem de poeira combustível está presente no ar permanentemente, por longos períodos ou frequentemente.	Local em que uma atmosfera explosiva sob a forma de uma nuvem de poeira combustível no ar é provável de ocorrer em condições de funcionamento normais.	Local em que uma atmosfera explosiva sob a forma de uma nuvem de poeira combustível no ar, não são prováveis de ocorrer em condições de funcionamento normais, mas, caso aconteçam, apenas por um curto período.



Normas aplicáveis

Norma IEC 60079-0

Conforme pudemos verificar no exemplo de marcação da página anterior, a marcação segundo a norma IEC 60079-0, acrescenta novos elementos à marcação definida pela Directiva 94/9/CE. Nas tabelas seguintes vamos verificar esses códigos associados.



Modo de protecção

É um conjunto de medidas de protecção que se aplicam, de modo a evitar a inflamação do ambiente envolvente, conforme o tipo de gases ou poeiras existentes.

Símbolo do modo	Zonas de aplicação			Definição
	0	1	2	
Atmosferas com presença de gases combustíveis				
d		✓	✓	Indica a capacidade de um dispositivo para conter qualquer ignição dentro de si e impede a fuga de qualquer ignição da explosão. Podem ocorrer faíscas, chamas ou materiais inflamados no invólucro, mas são impedidos de contactar com o ambiente exterior ao invólucro.
e		✓	✓	Indica que as atmosferas perigosas podem penetrar no invólucro, mas não há ignição, porque não existem arcos ou faíscas dentro do invólucro, e a temperatura da superfície das peças ou componentes não é suficientemente elevada para provocar a ignição. A classificação mínima de protecção exigida é de IP65.
i	ia	✓	✓	A segurança intrínseca baseia-se em limitar os níveis de energia para que atmosferas combustíveis não possam ser inflamadas. Se ocorrerem duas falhas (curto-circuito ou interrupção) e o dispositivo ainda é intrinsecamente seguro de acordo com as normas, o dispositivo é marcado como "ia" e adequado para qualquer zona, incluindo a zona 0. A marcação "ib" permite uma falha e é adequado para utilização nas zonas 1 e 2.
	ib		✓	
m		✓	✓	As partes que representem potenciais fontes de ignição de contacto com ambientes inflamáveis, são encapsuladas com resina epóxi ou matérias semelhantes, suficientemente resistentes às condições ambientais, de forma a que o ambiente explosivo não possa ser inflamado.
n			✓	Este modo é aplicado a equipamentos que em funcionamento normal e em determinadas condições anormais, não inflamam o ambiente explosivo que os rodeia. Existem 5 categorias de materiais: sem produção de faíscas (nA), produzem faíscas (nC), encapsulados com respiração limitada (nR), de energia limitada (nL) e com pressurização interna simplificada (nP).
o		✓	✓	A imersão em óleo impede a ignição, dado que as potenciais fontes de ignição estão rodeadas por óleo, evitando assim o contacto com atmosferas explosivas. O óleo sela um aparelho eléctrico, tornando impossível, o contacto com as atmosferas explosivas.
p		✓	✓	A pressurização indica retirar quaisquer gases perigosos que possam estar presentes no interior do invólucro, deslocando-o com grandes volumes de ar ou gás inerte. Uma vez purificado, a sobrepressão é continuada para evitar gases perigosos de entrarem.
q		✓	✓	O invólucro é cheio com material pulverento para impedir qualquer ignição e qualquer contacto com atmosferas explosivas. É utilizado geralmente um pó inerte ou areia. Este método é usado em equipamentos eléctricos e peças de componentes em que, a corrente é menor ou igual a 16 A, a tensão de alimentação é menor ou igual a 1000 V e o consumo de energia é menor ou igual a 1000 W.
Atmosferas com presença de poeiras combustíveis				
tD		✓	✓	Equipamentos eléctricos protegidos por revestimento e por limite da temperatura de superfície, destinados a serem utilizados em locais, onde a presença de poeiras combustíveis pode conduzir ao risco de incêndio ou explosão. A protecção é efectuada através de revestimentos estanques a poeiras ou protegidos contra poeiras.
mD	maD	✓	✓	Equipamentos eléctricos protegidos por revestimento de tipo "mD" e por limite da temperatura de superfície, destinados a serem utilizados em locais, onde a presença de poeiras combustíveis pode conduzir ao risco de incêndio ou explosão. Neste caso, as peças susceptíveis de provocar inflamação são colocadas num composto, de modo a evitar a deflagração.
	mbD		✓	
iD	✓	✓	✓	Equipamentos eléctricos de segurança intrínseca, destinados a serem utilizados em ambientes com nuvens ou camadas de poeiras combustíveis.

ANEXO B

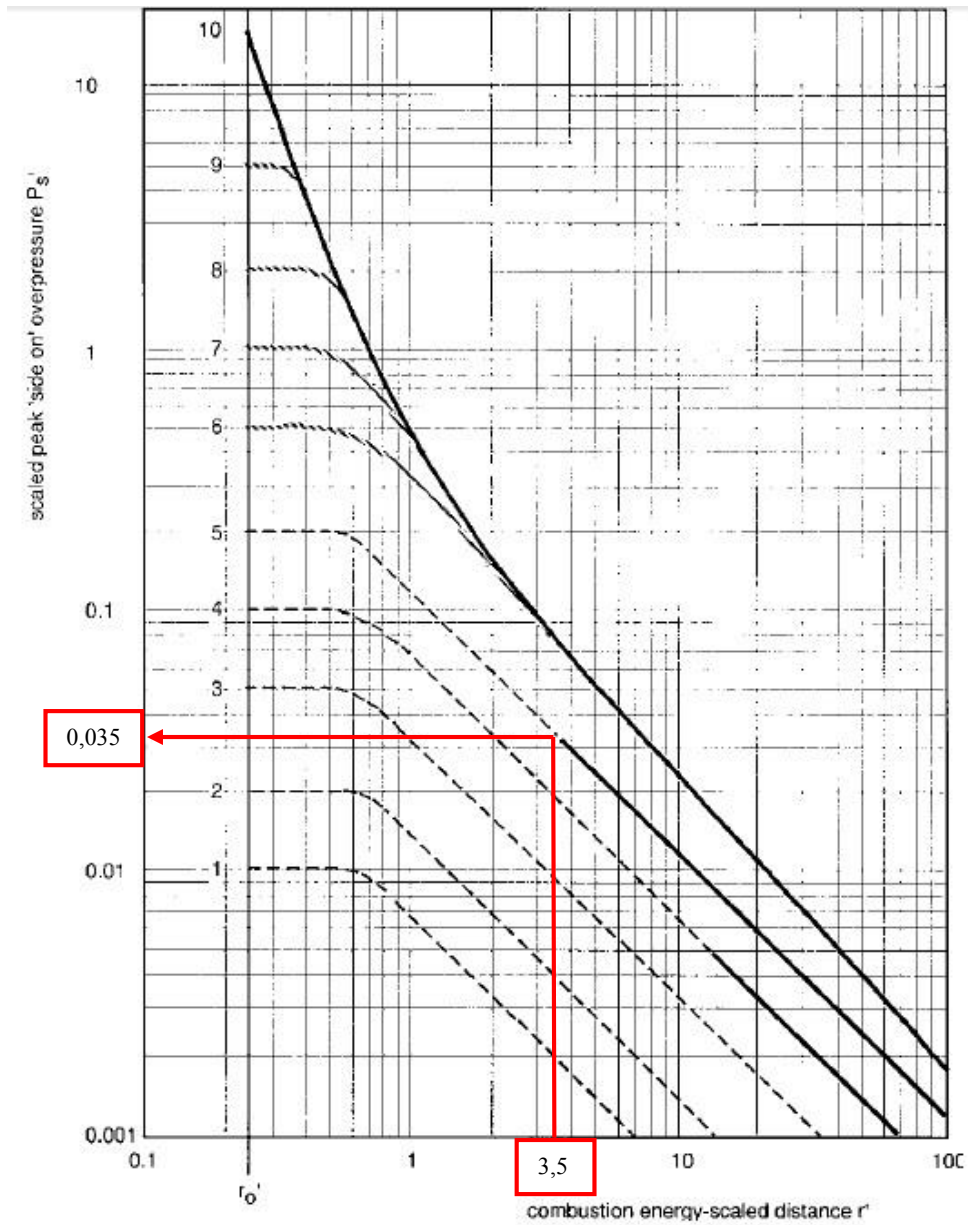
- Exemplos de programas pagos e as principais funcionalidades (Dados retirados de Reniers et al., 2006)

	Gama de riscos cobertos									Grafismo	Os resultados dos cálculos podem apoiar						Informação de Preços
	Riscos operacionais	Riscos processuais	Incêndio	Explosão	Dispersão	Toxicidade	Ambiental	Risco dominó interior	Risco dominó exterior	Plataforma SIG disponível	Decisões de investimento	Decisões de localização	Decisões de planeamento e zonamento	Decisões de planeamento e resposta de emergência	Cálculo de zonas de efeito	Cálculo em tempo real	
1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	6450€
2		•	•	•	•	•				•	•		•	•			3000€
3	•	•															3000€
4		•	•	•								•	•				\$549
5	•	•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	•	•	\$8745
6	•	•	•	•			•			•		•	•	•	•	•	\$1995
7	•	•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	•	•	\$3995
8	•	•		•	•	•	•			•		•	•	•	•	•	\$2995
9	•	•	•	•	•		•			•		•	•	•	•	•	\$3995
10		•	•				•			•		•	•		•		\$4950
11		•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	\$14000
12		•	•	•				•			•	•	•	•	•	•	\$1500
13	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	8720€
14	•	•									•						\$1995
15	•	•	•		•	•	•						•	•			\$995
16		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•		3000€
17	•	•	•	•	•	•	•				•	•	•	•	•	•	\$25000
18		•			•	•						•	•		•		\$1490

1=AIDRAM-CARGO; 2=ARIPAR; 3=AVRIM2; 4=BIS; 5=BREEZE Explosion; 6=BREEZE Fire/Explosion; 7=BREEZE Hazard Professional; 8= BREEZE HAZ Dispersion; 9=BREEZE LFG Fire/Risk; 10=CALPUFF View; 11=CHARM; 12=ExTool; 13=FRED/Shepherd; 14=Hazard ReviewLeader; 15=RMP View; 16=SAVE; 17=SEVEX View; 18=SLAB View.

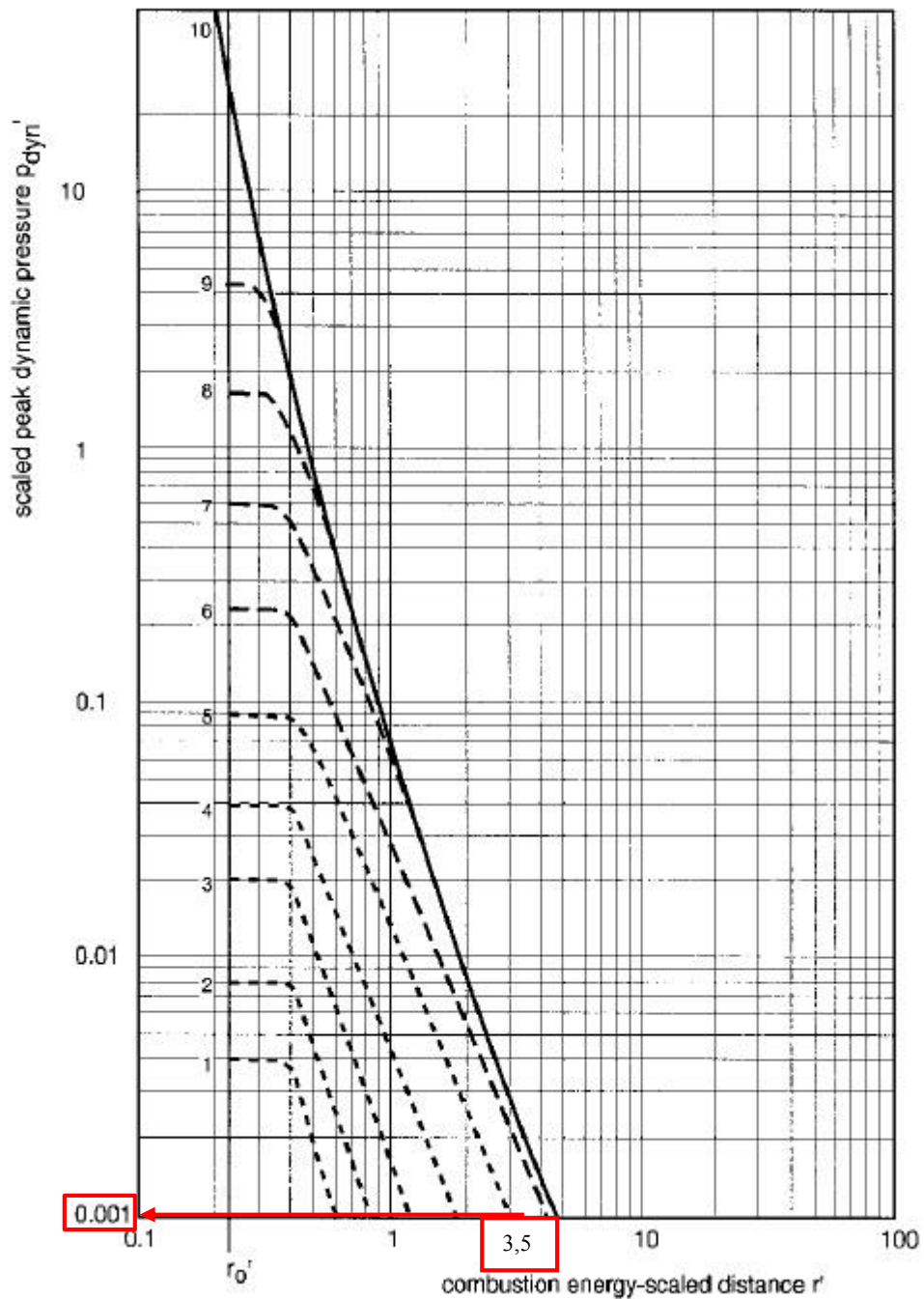
ANEXO C

Gráfico do método Multi-Energy para o cálculo do pico de sobrepressão (Yellow Book)



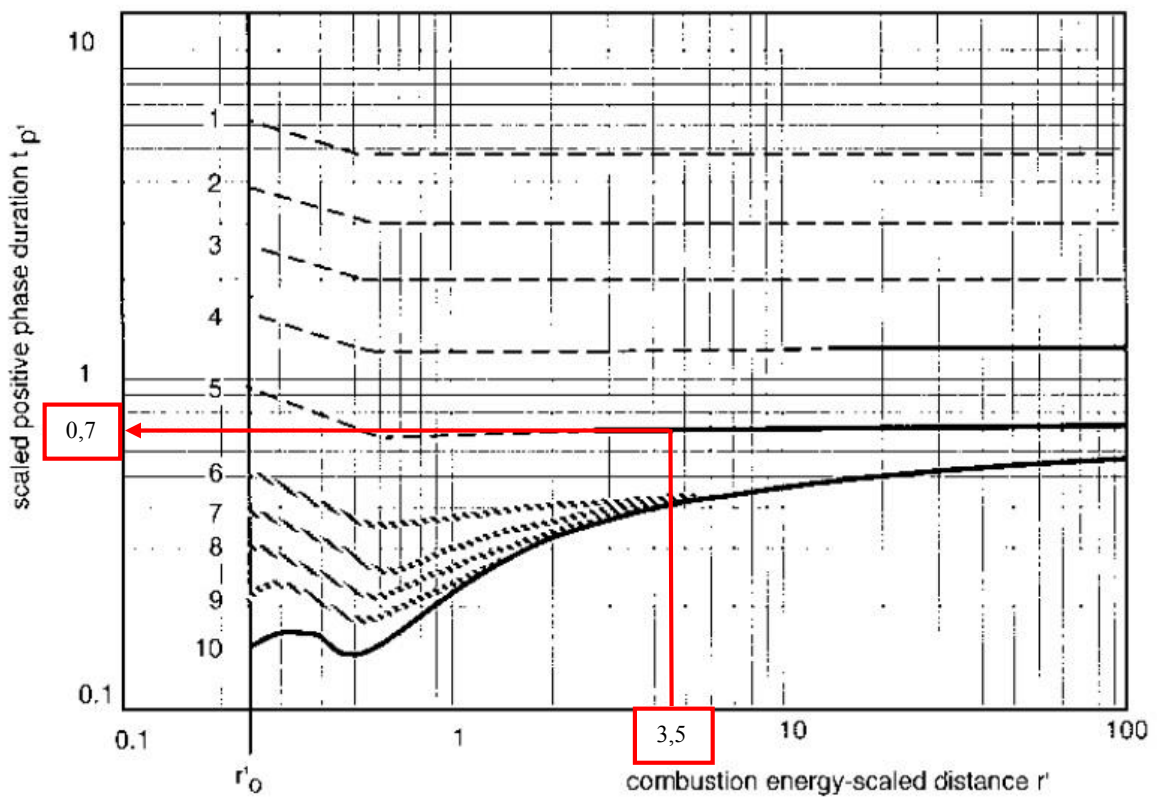
ANEXO D

Gráfico do método Multi-Energy para o cálculo do pico de sobrepressão dinâmica (Yellow Book)



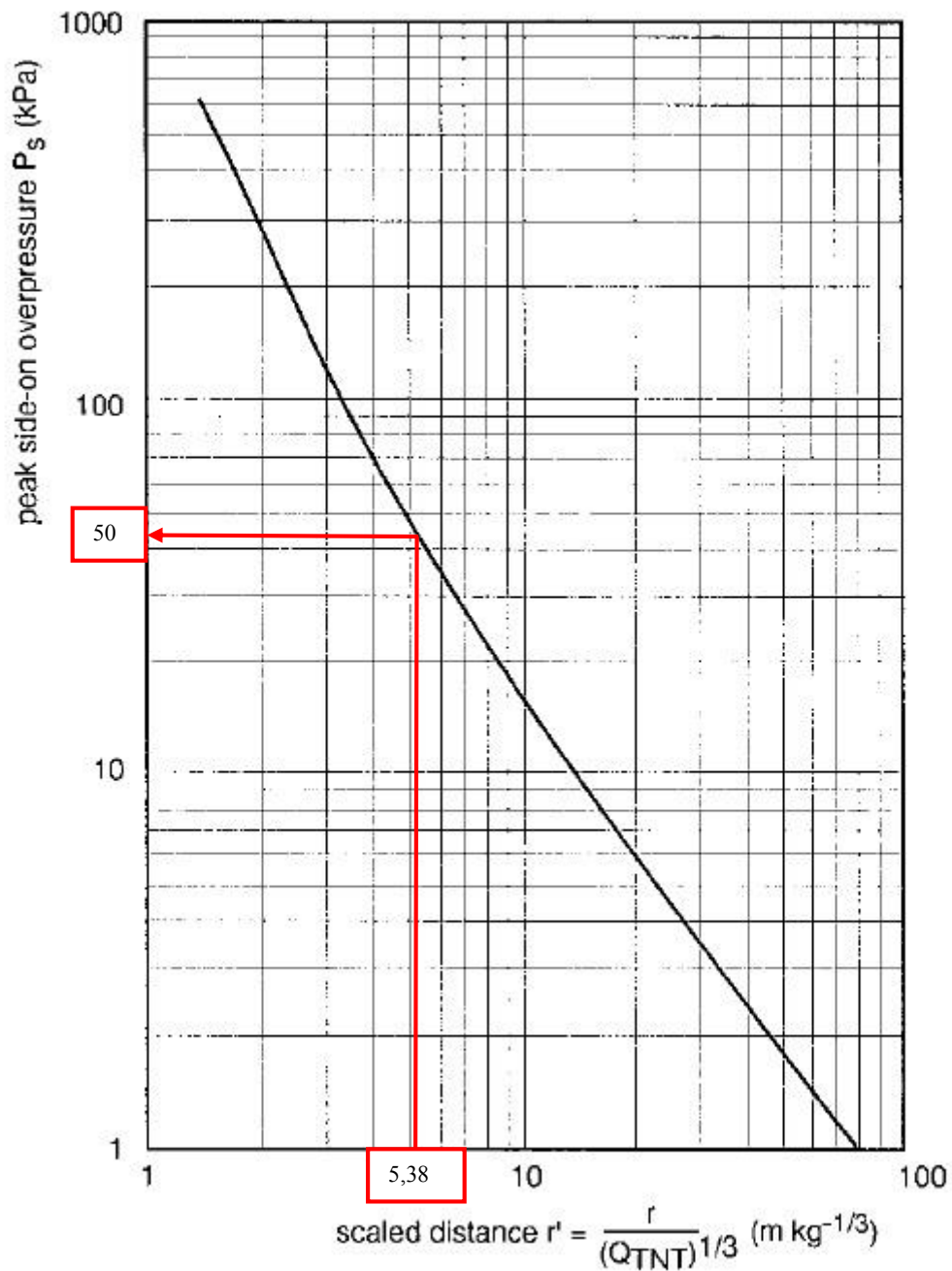
ANEXO E

Gráfico do método Multi-Energy para o cálculo do tempo da fase positiva (Yellow Book)



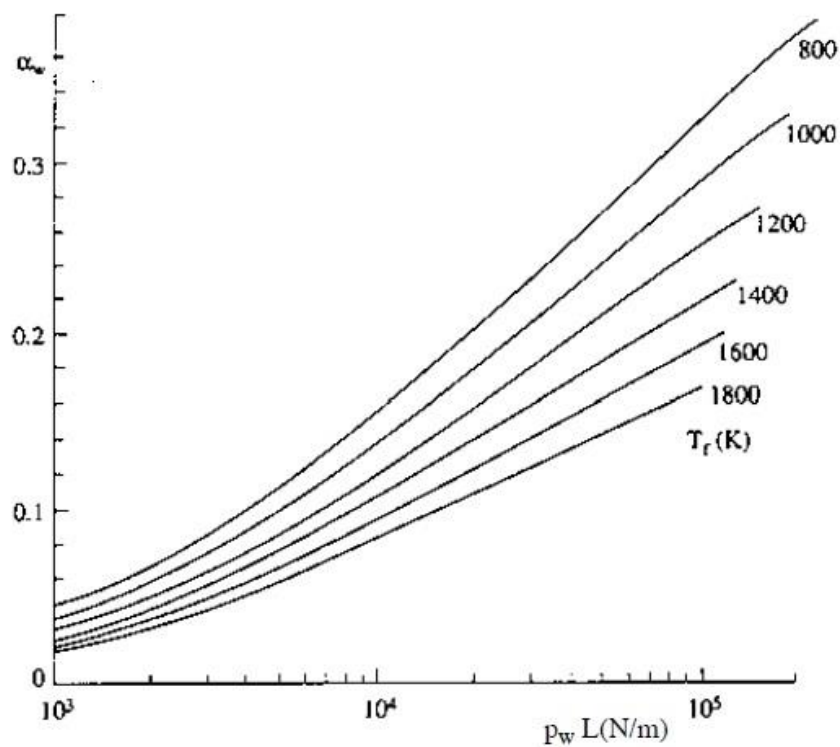
ANEXO F

Gráfico do método TNT Equivalency para o cálculo do pico de sobrepressão (Yellow Book)



ANEXO G

Gráfico para o cálculo do método BLEVE: Fatores de absorção para vapor de água
(Yellow Book)



APÊNDICE A

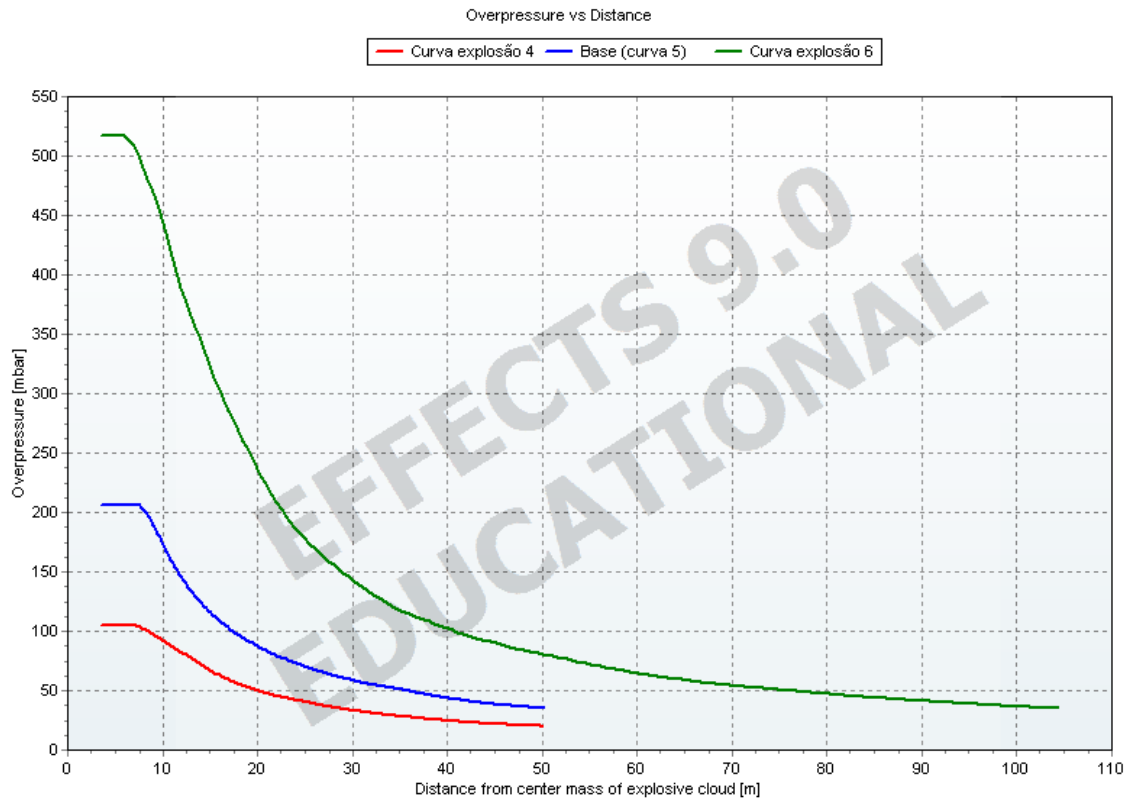
Apêndice A-I Comparação da variação da distância onde ocorre a fuga da matéria perigosa, no modelo Multi-Energy

Parameters			
Inputs	Base (50m)	Variação 20% da distância da libertação	Variação 50% da distância da libertação
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Ambient pressure (bar)	1,013	1,013	1,013
Total mass in explosive range (kg)	13	13	13
Fraction of flammable cloud confined (-)	0,5	0,5	0,5
Curve number	5 (Medium deflagration)	5 (Medium deflagration)	5 (Medium deflagration)
Distance from release (Xd) (m)	50	60	75
Offset between release point and cloud centre (m)	1	1	1
Threshold overpressure (mbar)	60	60	60
Results	Base (50m)	Variação 20% da distância da libertação	Variação 50% da distância da libertação
Confined mass in explosive range (kg)	6,5	6,5	6,5
Total combustion energy (MJ)	299,08	299,08	299,08
Peak overpressure at Xd (mbar)	35,141	28,823	23,441
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)	1,013	1,013	1,013
Pressure impulse at Xd (Pa*s)	53,155	43,673	35,593
Positive phase duration at Xd (ms)	30,252	30,304	30,368
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	29,322	29,322	29,322
Blast-wave shape at Xd	Pressure wave	Shock Wave	Shock Wave
Damage (general description) at Xd	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage
Damage to brick houses at Xd	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).	Damage to roofs, ceilings, minor crack formation in plastering, more than 1% damage to glass panels (1 - 1.5 kPa)	Damage to roofs, ceilings, minor crack formation in plastering, more than 1% damage to glass panels (1 - 1.5 kPa)
Damage to typical American-style houses at Xd	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage
Damage to structures (empirical) at Xd	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage

Apêndice A-II Comparação da variação da massa no modelo Multi-Energy

Parameters			
Inputs	Base (13kg)	30kg	50kg
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Ambient pressure (bar)	1,013	1,013	1,013
Total mass in explosive range (kg)	13	30	50
Fraction of flammable cloud confined (-)	0,5	0,5	0,5
Curve number	5 (Medium deflagration)	5 (Medium deflagration)	5 (Medium deflagration)
Distance from release (Xd) (m)	50	50	50
Offset between release point and cloud centre (m)	1	1	1
Threshold overpressure (mbar)	60	60	60
Results	Base (13kg)	30kg	50kg
Confined mass in explosive range (kg)	6,5	15	25
Total combustion energy (MJ)	299,08	690,2	1150,3
Peak overpressure at Xd (mbar)	35,141	46,748	55,25
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)	1,013	1,3803	2,0922
Pressure impulse at Xd (Pa*s)	53,155	93,199	128,69
Positive phase duration at Xd (ms)	30,252	39,873	46,583
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	29,322	38,749	45,942
Blast-wave shape at Xd	Pressure wave	Pressure wave	Pressure wave
Damage (general description) at Xd	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).
Damage to brick houses at Xd	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).
Damage to typical American-style houses at Xd	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage
Damage to structures (empirical) at Xd	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage	No damage or very minor damage

Apêndice A-III Comparação da variação das curvas de explosão no modelo Multi-Energy



Apêndice A-IV Comparação da variação da distância onde ocorre a fuga da matéria perigosa, no modelo TNT Equivalency

Parameters			
Inputs	Base(10m)	Variação 20% distância de libertação	Variação 50% distância de libertação
Type of TNT model	Based upon energy	Based upon energy	Based upon energy
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Total mass in explosive range (kg)	13	13	13
Equivalency factor (-)	0,1	0,1	0,1
Fraction of flammable cloud confined (-)	0,5	0,5	0,5
Distance from release (Xd) (m)	10	12	15
Offset between release point and cloud centre (m)	1	1	1
Threshold overpressure (kPa)	202,65	202,65	202,65
Results	Base(10m)	Variação 20% distância de libertação	Variação 50% distância de libertação
Peak overpressure at Xd (mbar)	512,42	364,74	250,81
Equivalent TNT mass (kg)	6,7666	6,7666	6,7666
Damage (general description) at Xd	Heavy damage (Zone B: 35 - 83 kPa).	Heavy damage (Zone B: 35 - 83 kPa).	Moderate damage (Zone C: 17 - 35 kPa).
Damage to brick houses at Xd	The damage is not repairable; 50% to 75% of the outer brick walls are lightly to heavily damaged. The remaining brick walls are unreliable (35 kPa).	The damage is not repairable; 50% to 75% of the outer brick walls are lightly to heavily damaged. The remaining brick walls are unreliable (35 kPa).	Not habitable without major repair works. Partial roof failures, 25% of all brick walls have failed, serious damage to the remaining carrying elements. Damage to windowframes and doors (7-15 kPa).
Damage to structures (empirical) at Xd	Brickstone walls (20-30 cm) have collapsed (50 kPa). Displacement of a cylindrical storage tank, failure of connecting pipes (50-100 kPa). Loaded train carriages turned over (50 kPa). Collapse of a pipe-bridge (40-55 kPa).	Displacement of a pipe-bridge, rupture of piping (35-40 kPa). Damage to a fractioning column (35-80 kPa). Plating of cars and trucks pressed inwards (35 kPa). Breakage of wooden	Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge

<p>Displacement of a pipe-bridge, rupture of piping (35-40 kPa). Damage to a fractioning column (35-80 kPa). Plating of cars and trucks pressed inwards (35 kPa). Breakage of wooden telephone poles (35 kPa). Cladding of light industry building ripped-off (30 kPa). Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).</p>		<p>telephone poles (35 kPa). Cladding of light industry building ripped-off (30 kPa). Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).</p>	<p>(20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).</p>
<p>Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)</p>	<p>100</p>	<p>100</p>	<p>100</p>
<p>Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)</p>	<p>100</p>	<p>100</p>	<p>100</p>
<p>Confined mass in explosive range (kg)</p>	<p>6,5</p>	<p>6,5</p>	<p>6,5</p>
<p>Dist. center mass of confined expl. cloud to study point (m)</p>	<p>9</p>	<p>11</p>	<p>14</p>
<p>Dist. center mass of cloud at threshold overpressure (m)</p>	<p>4,451</p>	<p>4,451</p>	<p>4,451</p>

Apêndice A-V Comparação da variação da massa no modelo TNT Equivalency

Parameters			
Inputs	Base(13kg)	30kg	50kg
Type of TNT model	Based upon energy	Based upon energy	Based upon energy
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Total mass in explosive range (kg)	13	30	50
Equivalency factor (-)	0,1	0,1	0,1
Fraction of flammable cloud confined (-)	0,5	0,5	0,5
Distance from release (Xd) (m)	10	10	10
Offset between release point and cloud centre (m)	1	1	1
Threshold overpressure (kPa)	202,65	202,65	202,65
Results	Base(13kg)	30kg	50kg
Peak overpressure at Xd (mbar)	512,42	840,89	1179,6
Equivalent TNT mass (kg)	6,7666	15,615	26,025
Damage (general description) at Xd	Heavy damage (Zone B: 35 - 83 kPa).	Total destruction (Zone A: > 83 kPa).	Total destruction (Zone A: > 83 kPa).
Damage to brick houses at Xd	The damage is not repairable; 50% to 75% of the outer brick walls are lightly to heavily damaged. The remaining brick walls are unreliable (35 kPa).	More than 75% of all outer brick walls have collapsed (70 kPa).	More than 75% of all outer brick walls have collapsed (70 kPa).
Damage to structures (empirical) at Xd	Brickstone walls (20-30 cm) have collapsed (50 kPa). Displacement of a cylindrical storage tank, failure of connecting pipes (50-100 kPa). Loaded train carriages turned over (50 kPa). Collapse of a pipe-bridge (40-55 kPa). Displacement of a pipe-bridge, rupture of piping (35-40 kPa). Damage to a fractioning column (35-80 kPa). Plating of cars and trucks pressed inwards (35 kPa). Breakage of wooden telephone poles (35 kPa). Cladding of light industry building ripped-off (30 kPa). Collapse of steel frames and	Brickstone walls (20-30 cm) have collapsed (50 kPa). Displacement of a cylindrical storage tank, failure of connecting pipes (50-100 kPa). Loaded train carriages turned over (50 kPa). Collapse of a pipe-bridge (40-55 kPa). Displacement of a pipe-bridge, rupture of piping (35-40 kPa). Damage to a fractioning column (35-80 kPa). Plating of cars and trucks	The supporting structure of a round storage tank has collapsed (100 kPa). Brickstone walls (20-30 cm) have collapsed (50 kPa). Displacement of a cylindrical storage tank, failure of connecting pipes (50-100 kPa). Loaded train carriages turned over (50 kPa). Collapse of a pipe-bridge (40-55 kPa). Displacement of a pipe-bridge, rupture of piping (35-40 kPa). Damage to a fractioning

displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).	pressed inwards (35 kPa). Breakage of wooden telephone poles (35 kPa). Cladding of light industry building ripped-off (30 kPa). Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).	column (35-80 kPa). Plating of cars and trucks pressed inwards (35 kPa). Breakage of wooden telephone poles (35 kPa). Cladding of light industry building ripped-off (30 kPa). Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).	
Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)	100	100	100
Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)	100	100	100
Confined mass in explosive range (kg)	6,5	15	25
Dist. center mass of confined expl. cloud to study point (m)	9	9	9
Dist. center mass of cloud at threshold overpressure (m)	4,451	5,8819	6,9737

Apêndice A-VI Comparação da variação da distância de libertação no modelo BLEVE

Parameters			
Inputs	Base Bleve	Variacao 20% Distância ao centro do deposito	Variacao 50% Distância ao centro do deposito
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Total mass in vessel (kg)	1000	1000	1000
Initial temperature in vessel (K)	293,15	293,15	293,15
Distance from centre of vessel (Xd) (m)	60	72	90
Height of the receiver (m)	1,5	1,5	1,5
Calculate contours for	1st degree burns	1st degree burns	1st degree burns
Heat radiation level (lowest) for first contour plot (kW/m ²)			
Heat radiation level for second contour plot (kW/m ²)			
Heat radiation level (highest) for third contour plot (kW/m ²)			
Results	Base Bleve	Variacao 20% Distância ao centro do deposito	Variacao 50% Distância ao centro do deposito
Duration of the Fire Ball (s)	5,1338	5,1338	5,1338
Max Diameter of the Fire Ball (m)	61,175	61,175	61,175
Max Height of the Fire Ball (m)	61,175	61,175	61,175
Surface emissive power (max) (kW/m ²)	246,61	246,61	246,61
1% First degree burns distance (m)	109,12	109,12	109,12
1% Second degree burns distance (m)			
1% Third degree (Lethal) burns distance (m)			
(Max) heat radiation level at Xd (kW/m ²)	25,447	20,622	15,223
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0,13065	0,10699	0,080232
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	78,979	78,162	76,936
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m ²) ^{4/3})	384,26	290,33	193,69
Percentage first degree burns at Xd (%)	82,56	53,618	12,91
Percentage second degree burns at Xd (%)			
Percentage third degree burns at Xd (%)			

Apêndice A-VII Comparação da variação da massa no modelo BLEVE

Parameters			
Inputs	Base Bleve	1500 kg	2000 kg
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Total mass in vessel (kg)	1000	1500	2000
Initial temperature in vessel (K)	293,15	293,15	293,15
Distance from centre of vessel (Xd) (m)	60	60	60
Height of the receiver (m)	1,5	1,5	1,5
Calculate contours for	1st degree burns	1st degree burns	1st degree burns
Heat radiation level (lowest) for first contour plot (kW/m ²)			
Heat radiation level for second contour plot (kW/m ²)			
Heat radiation level (highest) for third contour plot (kW/m ²)			
Results	Base Bleve	1500 Kg	2000 Kg
Duration of the Fire Ball (s)	5,1338	5,7046	6,1476
Max Diameter of the Fire Ball (m)	61,175	69,792	76,632
Max Height of the Fire Ball (m)	61,175	69,792	76,632
Surface emissive power (max) (kW/m ²)	246,61	255,78	262,49
1% First degree burns distance (m)	109,12	132,84	152,57
1% Second degree burns distance (m)			
1% Third degree (Lethal) burns distance (m)			
(Max) heat radiation level at Xd (kW/m ²)	25,447	29,757	32,889
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0,13065	0,14736	0,1588
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	78,979	78,95	78,9
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m ²) ^{4/3})	384,26	526,05	647,82
Percentage first degree burns at Xd (%)	82,56	97,021	99,401
Percentage second degree burns at Xd (%)			
Percentage third degree burns at Xd (%)			

