### UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Tese de Doutorado

# PROPOSTAS DE DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA PARA EDIFICAÇÕES COM BASE EM ESTUDOS DE EFEITOS DE EXPLOSÕES REFERENCIADOS AO EQUIVALENTE TNT

AUTOR:LETIVAN GONÇALVES DE MENDONÇA FILHOORIENTADOR:PROF DR. REGINALDO GUIRARDELLOCO-ORIENTADOR:PROF DR. DEMÉTRIO BASTOS NETTO

Campinas - São Paulo - Brasil

Fevereiro - 2006

UNICAMP BIBLIOTECA CONTRAL CESAR LASTES DESERVOLVIMENTO DE COLUÇÃO

### **UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

# FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Área de concentração:

### DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

# PROPOSTAS DE DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA PARA EDIFICAÇÕES COM BASE EM ESTUDOS DE EFEITOS DE EXPLOSÕES REFERENCIADOS AO EQUIVALENTE TNT

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química por parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

AUTOR: LETIVAN GONÇALVES DE MENDONÇA FILHO ORIENTADOR: PROF DR. REGINALDO GUIRARDELLO CO-ORIENTADOR: PROF DR. DEMÉTRIO BASTOS NETTO

Campinas - São Paulo - Brasil

Fevereiro - 2006

UNICAMP	
BIBLIC PRACTOWNAL	
CORAC LA TES	
DESERVICED BROGEN FRE COMPLETE	
A CALL OF THE ACCOUNT OF ACCOUNT	• • • •

,

UNIDADEO
Nº CHAMADA TTUNI (AMP
<u>M523</u> p
VEX
TOMBOBCI TOTTT
PROC. 16123-06
cDX
PREÇO (1, 0)
DATA 28/1106
BIB-10 392667

### FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -UNICAMP

M523p	Mendonça Filho, Letivan Gonçalves de Propostas de distâncias de segurança para edificações com base em estudos de efeitos de explosões referenciados ao equivalente TNT / Letivan Gonçalves de Mendonça Filho - Campinas SP: Is n 1, 2006	
	de Mendonya i mioCampinas, 51 . [3.11.], 2000.	
	Orientador: Reginaldo Guirardello; Demétrio Bastos	
	Netto. Tara (Doutomda) - Unicorridada Estadual da	
	Comminen Teseridade de Encembraio Onímico	
	Campinas, Faculdade de Engennaria Química.	
	1. Explosivos. 2. Explosões. 3. Segurança do	
	trabalho, I. Guirardello, Reginaldo, II. Bastos Netto.	
	Demétrio. III. Universidade Estadual de Campinas.	
	Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.	
Titulo	em Inglês: Sugestion of safety distances to inhabited building	ng
	considering the data of effects referent to the equ	ivalent
	TNT.	
Palav	ras-chave em Inglês: Explosives; Explosion; Safety distance	5.
Área d	de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos	
Titula	ção: Doutor em Engenharia Química	
Banca	examinadora: Reginaldo Guirardello, Gustavo Paim Valenç	a, José
	Roberto Nunhez, Carlos Eduardo Rolfsen Sal	les e
	Heraldo da Silva Couto.	

Data da defesa: 22 fev. 2006

.

•

# Dedicatória

Dedico este trabalho

aos meus pais , LETIVAN e ONEIDA, à minha esposa VANESSA aos meus filhos, GABRIEL e DAVI. Tese de Doutorado defendida por Letivan Gonçalves de Mendonça Filho e aprovada em 22 de fevereiro de 2006 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof/Dr. HERALDO DA SILVA COUTO - (titular)

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Letivan Gonçalves de Mendonça Filho e Aprovada pela comissão julgadora em 22 de fevereiro de 2006

adethe 

Prof. Dr. Reginaldo Guirardello Orientador

## Agradecimentos

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Reginaldo Guirardelo e Prof. Dr. Demétrio Bastos Netto, pela orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Heraldo da Silva Couto pelas correções e melhorias no texto deste trabalho.

Ao Cap PM Décio Leão que me despertou a atenção para o tema e pelo constante estímulo e amizade.

À Cap Danielle Guanaes Ladeira Seiblitz, pela literatura estrangeira fornecida propiciando o início dos estudos.

Ao TC Vagner Pinheiro Carinni, pelo incentivo no desenvolvimento do tema.

Ao Gen Bda Benedito Lajoia Garcia, vice-presidente executivo da Indústria de Material Bélico do Brasil em 2001, pela autorização para desenvolver este trabalho em tempo parcial e pelo auxílio na aquisição de passagem para o primeiro seminário em Atlanta – EUA.

Ao Maj Vladmir Hallak Gabriel pelo auxílio em todas as horas.

Ao Gen Bda Fernando Antonio Veloso Manguinho, Superintendente da Fábrica Presidente Vargas, pelo apoio e incentivo tanto no desenvolvimento como na aplicação dos conceitos desta tese.

Ao Conselho de Explosivos e Segurança do Departamento de Defesa Americano - "Department of Defense Explosives Safety Board – USA", na pessoa do seu Dirigente Capt Willian Wright, pelo fornecimento de compêndio com todos os trabalhos apresentados nos 30 seminários realizados anteriormente a nossa participação e pela nossa recepção como delegação Brasileira.

Ao Departamento de Defesa do Reino Unido, na pessoa do Sr. Jon Henderson, pelo CD de dados contendo informações sobre os experimentos realizados com explosões de paióis pela OTAN no deserto de Woomera (Austrália).

#### Resumo

MENDONÇA FILHO, LETIVAN G.. Propostas de Distâncias de Segurança para Edificações com Base em Estudos de Efeitos de Explosões Referenciados ao Equivalente TNT. Campinas : Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2006. Brasil Tese (Doutorado)

Este trabalho utiliza o conhecimento científico relativo a explosões e efeitos associados para sugerir distâncias de segurança para proteção de edificações nas proximidades de explosivos e atmosferas inflamáveis, para aplicação nas áreas civil e militar.

Através da análise de um inquérito de um acidente ocorrido em 1964 foi possível relacionar as duas metodologias utilizadas para estabelecer as distâncias atuais de segurança para habitações. Verificou-se algumas falhas em um dos trabalhos originais e com a correção proposta foram apresentadas novas equações relacionando massa de explosivo, distância e o custo de reparos para residências. Avaliou-se as distâncias de segurança adotadas no Brasil por meio de diversas correlações estatísticas. Foi realizado um estudo experimental consistindo na montagem e posicionamento de uma carga de explosivo em frente a uma edificação, a uma distancia variável de uma vidraça fixa. Com base neste estudo foram identificados diversos aspectos referentes à fragmentação de vidraças como: Relação entre espessura, impulso e velocidade de fragmentos. Novas distâncias de segurança foram propostas considerando uma diferenciação em relação ao tipo de estabelecimento, uso de taludes e o equivalente TNT da massa de explosivo. Uma alternativa de armazenagem é mostrada baseada no conceito de separação em compartimentos dos materiais explosivos para adequar os valores de distância de seguranca praticados com os valores idealizados. No caso de explosões gasosas, tratou-se um caso real envolvendo uma explosão em um navio de transporte de material inflamável. Com base neste estudo foram propostas novas distâncias de segurança para atmosferas explosivas, usando o método multi-energético e o conhecimento da relação entre danos e sobrepressão desenvolvidos.

Palavras Chaves: Explosivos, Explosões, Segurança

### Abstract

MENDONÇA FILHO, LETIVAN G. Suggestion of safety distances to inhabited Building considering the data of effects referent to the equivalent TNT. Campinas : School of Chemical Engineering, State University of Campinas- UNICAMP, 2006. Brasil Tese (Doutorado)

This work uses the original military scientific know how on explosions and its effects to suggest safety distances to cases dealing with explosives and inflammable atmospheres.

Considering the information contained in an investigation of an accident which took place in 1964 in a production line of gunpowder at the "Fabrica Presidente Vargas", in the city of Piquete, São Paulo, it was possible to relate and review the two main techniques used as the basis of the actual safety distances in inhabited building in USA and Europe. Based on this study it was suggested some corrections at the american technique. With the correction it was possible to suggest two probit equations relating distance, weight of explosives and the repair costs to brick and wood houses. As the American analysis to determinate the safety distances was based on a patrimonial criterion and we were interested in establishing a criterion centered in the human being, several statistical correlations were employed to evaluate the effect of explosions on the human being, considering the safety distances of the Brazilian legislation. Due to the relevance of the risks associated with the glass hazards generated in window breakage by overpressure an experimental study was performed. The experiment consisted in blasting explosive charge close to window so that the initial velocity was measured using a laser system with an electronic chronometer. The overpressure generated by the blast broke the window and threw the fragments against a special kind of foam glued on a wood wall. Some of the fragments were caught by the foam, in such away that it was possible to identify aspects concerning window breakaging relations between fragments thickness and initial velocity. Also the effect of drag on the terminal velocity of fragments. Based on these studies new safety distances were suggested take in account the diversity of the establishments. The attenuation effect by the use of barriers and the TNT equivalents of explosives and propellants were considered also in the new safety distances. The new values were compared with the Brazilian legislation leading to a proposal for storage of explosive materials dividing them into several compartments to be adequate the actual values of the legislation with the suggested one. Considering the case of gas/vapor explosion, we dealt with a real case of explosion. Aspects related to evaporation, dispersion and development of inflammable and explosives atmospheres were considered along with the analysis of sensitivity of stimulus to ignition. A mechanism of the storage vessel rupture was suggested based on the thermodynamic and kinetics analysis of the combustion system. Having the motivation of the necessity to define safety distances in similar cases it was suggested safety distances using the multi energy method developed by the TNO and the knowledge of the relation between damage and overpressure. Keywords: Explosives, Explosion, Safety distances

# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS	2
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 EXPLOSÕES EM NUVENS DE GÁS/VAPOR	5
2.2 EXPLOSIVOS	
CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO nº 1 – EXPLOSÃO DE P.	AIOL COM MASSA
EQUIVALENTE A 40 T DE TNT	
3.1 HISTÓRICO DO TESTE	
3.2 DESCRIÇÃO DO EVENTO	
CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO nº 2 – EXPLOSÃO DE	1964 NA FÁBRICA
PRESIDENTE VARGAS	
4.1 HISTÓRICO DO ACIDENTE	
4.2 AVALIAÇÃO DA CARGA EQUIVALENTE TNT	
4.2.1 Descrição do Método	
4.2.2 Aplicação do Método	45
4.2.3 Resultados e Discussão do Método	56
4.2.4 Conclusão do Método	
4.3 ESTIMATIVA DE DANOS PATRIMONIAIS PELO	
MÉTODO DE WILSON (1974)	
4.3.1 Introdução do Método	
4.3.2 Desenvolvimento	
4.3.3 Resultados e Discussão	67

# CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DE RISCO UTILIZANDO CORRELAÇÕES

# ESTATÍSTICAS

5.1 INTRODUÇÃO	73
5.2 DESENVOLVIMENTO	74
5.2.1 Fatores Desconsiderados no Estabelecimento das Distâncias de Segurança	74
5.2.2 Uso de Correlações para Estimativa de Lesões e Falecimento	76
5.2.3 Resultados e Discussão	78
5.3 RELAÇÃO ENTRE QUEBRA DE VIDRAÇAS E FERIDOS	94
CAPÍTULO 6 –EFEITO DA SOBREPRESSÃO SOBRE JANELAS	
6.1 INTRODUÇÃO	99
6.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	105
6.3 DESENVOLVIMENTO	.106
6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
CAPÍTULO 7 – PROPOSTA DE NOVAS DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA	
7.1 INTRODUÇÃO	.117
7.2 EFEITO DA ATENUAÇÃO DA SOBREPRESSÃO PELA PRESENÇA DE	
TALUDES	118
7.3 DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA CONSIDERANDO O EQUIVALENTE TNT	123
7.4 COMPARAÇÃO DAS DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA COM AS PREVISTAS	5
PELO R-105	126
7.5 RISCOS INERENTES A ATUAL LEGISLAÇÃO	128
7.6 DISTÂNCIAS ESCALARES SUGERIDAS PARA OS DIVERSOS TIPOS DE	
PÚBLICO	136
7.7 O ACIDENTE DE TOLOUSE EM 2001	137
7.8 SEPARAÇÃO DA MASSA DE EXPLOSIVOS EM COMPARTIMENTOS	138

# CAPÍTULO 8 – EFEITOS PSICOLÓGICOS E DE RUÍDO

8.1 INTRODUÇÃO	
8.2 EFEITO DO RUÍDO	142
8.3 O FATOR DE REJEIÇÃO	
CAPÍTULO 9 - ESTUDO DE CASO Nº 3 – ACIDENTE EN	VOLVENDO A
EXPLOSÃO DE NAVIO CONTENDO MATERIAL INFLA	MÁVEL
9.1 INTRODUÇÃO	
9.2. ASPECTOS DE EVAPORAÇÃO E DIFUSÃO DOS VAP	ORES DE METANOL NO
AR AMBIENTE	
9.2.1 Introdução	
9.2.2 Desenvolvimento do Modelo de Evaporação de Met	anol152
9.2.3 Estimativa de Parâmetros:	
9.2.4 Modelo de Evaporação no Estado Estacionário Con	siderando Dispersão pelo
Efeito de Vento	
9.2.4.1 Estimativa do Número de Schimidt	
9.2.4.2 Estimativa da Densidade da Mistura Gasosa	
9.2.4.3 Cálculo do Número de Schimidt	
9.2.5 Resultados e Discussão	
9.2.6 Conclusão do Item	
9.3 ASPECTOS TERMODINÂMICOS ASSOCIADOS À REA	ÇÃO DE COMBUSTÃO
DE METANOL: PRODUTOS, TEMPERATURA E PRESSÃO	
9.3.1 Introdução Sobre os Aspectos Termodinâmicos	
9.3.2 Diagrama de Inflamabilidade	
9.3.3 Temperatura de Queima Adiabática	
9.3.4 Pressão Decorrente da Combustão	

9.3.5 Conclusão dos Aspectos Termodinâmicos.	
9.4 ASPECTOS RELACIONADOS A SENSIBILIDADE DE IGNIÇÃO DO N	METANOL
9.4.1 Introdução Sobre os Aspectos Relacionados	
9.4.2 Relação entre Temperatura de Autoignição e Concentração	
9.4.3 Relação entre Energia Mínima de Ignição e Concentração	
9.5 MECANISMO DE ROMPIMENTO DO TANQUE	174
9.5.1 Introdução Sobre o Mecanismo de Ruptura	174
9.5.2 Cinética de Ruptura	
9.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTI-ENERGÉTICO	
CAPÍTULO 10 – DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA PARA NUVENS GAS	OSAS
10.1 INTRODUÇÃO	199
10.2 DESENVOLVIMENTO	
CAPÍTULO 11 – CONCLUSÃO	207
BIBLIOGRAFIA	215
ANEXOS	223

# NOMENCLATURA

Símboio	Descrição Ur	nidade
A	Classe de Categoria de Danos de Edificação	
Av	Área de ventilação	[ m <sup>2</sup> ]
Ai	Área interna	[ m²]
В	Classe de Categoria de Danos de Edificação	
Са	Classe de Categoria de Danos de Edificação	
С, с <sub>і</sub>	Concentração do componente i.	
Cb	Classe de Categoria de Danos de Edificação	
Сг	Coeficiente de aumento de pressão	[m/(bar.s)]
D	Classe de Categoria de Danos de Edificação	
D <sub>E i</sub>	Distancia do Epicentro até a Classe de Danos	[m]
Di	Coeficiente de difusividade do componente i	[m²/s]
Ea	Energia de Combustão Disponível por unidade de volum	e [J/m³]
Fc	Fator de forma e polaridade	
h	espessura de chapa metálica	[ m ]
Kg	Constante da lei cúbica de aumento de pressão	[bar-m/s]
kc <sub>i</sub>	Constante relativa as categorias de danos	
	( distância em escala)	[ m/kg <sup>1/3</sup> ]
k	Constante de Boltzmann [1,38	305.10 <sup>-23</sup> J/K]
Mi	Peso Molecular do Componente	[moles]
n <sub>i</sub>	Fração molar do componente i	[%]
Prob	Probabilidade	
Р	Pressão	[ atm]
Pa	Pressão Ambiente	[ atm]
Pr	Pressão relativa ( relativa a pressão ambiente) = P/Pa	
Q	Massa de Explosivos	[ kg ]
R	Constante dos universal dos gases 83,1451 ba	r.cm <sup>3</sup> /(mol.K)
Re	Numero de Reynolds	[-]

XX		
ro	Raio da esfera equivalente ao volume inflamável	[ m ]
S	Altura	[ m]
Sc	Numero de Schimidt	
Т	Temperatura	[K]
t	Tempo	[s]
V	Volume da Atmosfera Inflamável	[ m <sup>3</sup> ]
Y	Variável das equações probit	
Z	Distancia em escala	[m/kg <sup>1/3</sup> ]

### Letras gregas

.

Símbolo	Descrição	Unidade
ρ	Densidade	[ <b>kg/</b> m <sup>3</sup> ]
ŋ	Coeficiente de viscosidade	[ kg/m.s]
ω	Fator acentrico	
v	Coeficiente de viscosidade cinemática	[ m²/s]
к	Fator de correção polar	
π	Constante ( 3,14159265)	
σ <sub>r</sub>	Tensão de ruptura	[ MPa]
$\sigma_{AB}$	Comprimento Característico	[ Å]
8 <sub>AB</sub>	Parâmetro de Energia Característica para uma interação A-B	
$\Omega_{D}$	Integral de colisão de difusão adimensional	

Abreviaturas	
Símbolo	Descrição
CORR	Correlação
ESTC	Comitê de Estocagem e Transporte de Explosivos - "Explosives
	Storage and Transport Committee (ESTC)"
HSE	Conselho Executivo de Segurança e Saúde no Trabalho-
	"Health and Safety Executive"

IBD	Distância de edificações habitadas –"Inhabited Building
	Distânce"- IBD
RE	Razão estequiométrica (Stequiometric fraction)
TNO	Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada-
	"Netherlands Organisation for Applied Scientific Research"
	"Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk
	onderzoek"
TNT	Trinitrotolueno ou trotil
VCE	Explosão em nuvem de vapor (Vapor Cloud Explosion)
VF	Fração molar de vapor (volumetric factor)

.

.

.

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

#### 1. 1 MOTIVAÇÃO

A evolução tecnológica, aliada ao crescimento demográfico e valorização da pessoa humana, gera rotineiramente a necessidade de desenvolvimento de novos campos de pesquisa e muitas vezes o desenvolvimento de um campo de pesquisa envolve a utilização de informações cujo acesso é restrito devido a aspectos de segurança. Durante muitos anos, o estudo de explosões e seus efeitos esteve limitado a pesquisas militares, devido ao aspecto de segurança nacional de que se revestia. Uma busca nos principais meios de pesquisa bibliográfica comprova este fato mostrando a carência de publicações de domínio público. De forma geral, a literatura produzida está associada a congressos e seminários cujo acesso à informação impõe, ainda, restrições à divulgação. Os cuidados tomados no controle e limitação de acesso a tais informações se justificam por envolver aspectos relacionados à segurança.

Entre os fatores que contribuem para que a pesquisa de explosões e seus efeitos, originalmente de cunho militar, seja aplicada para proporcionar segurança no meio civil, pode-se citar casos como o crescimento demográfico ao redor de locais potenciais de explosões, tais como: quartéis, paióis, pedreiras e fábricas de explosivos e acessórios entre outros. Para explosões oriundas de mistura arcombustível cita-se refinarias, locais de estocagem de combustíveis, navios de transporte de líquidos inflamáveis etc. Explosões intensas podem ainda serem geradas em equipamentos como caldeiras e reatores químicos, não esquecendo o risco associado a explosões durante o transporte de materiais inflamáveis pressurizados como GLP ou GNP que trafegam dentro das cidades.

Como explosões são susceptíveis de ocorrer de forma imprevisível, é obvia a necessidade de ferramentas matemáticas para se avaliar o potencial de risco para população próxima a um possível evento.

Uma especial atenção necessita ser dada ao conceito de distância de

segurança para explosões. Geralmente entende-se pelo uso do bom senso que a distância de segurança é aquela em que o indivíduo está livre de sofrer algum dano. Entretanto esta distância decorre de um critério probabilístico de risco ou dano aceitável, ou seja, para o estabelecimento das distâncias de segurança o legislador admitiu a existência tanto de danos patrimoniais como de probabilidades reduzidas de falecimento e/ou ferimentos. Assim, surpreende a muita gente que a adoção de distâncias de segurança limitam danos, mas não os eliminam.

#### 1.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

No Capítulo 2 é feita uma revisão sobre explosões gasosas, relacionando os fenômenos associados ao desenvolvimento da intensidade da explosão. Deste modo, inicia-se com os aspectos relacionados à temperatura de auto ignição, velocidade de queima laminar e limite de inflamabilidade . A influência de diversos fatores como energia de ignição, grau de obstrução e confinamento são discutidos e relacionados aos processos de deflagração e detonação. Para materiais explosivos sólidos, apresenta-se uma discussão de como as ondas de sobrepressão são geradas. Relaciona-se a intensidade e duração das ondas de sobrepressão com os danos resultantes. Reve-se os conceitos de distância de segurança, apresentando sua evolução histórica, motivação e alterações. Comparara-se as legislações adotadas pelos EUA, Inglaterra, Noruega, França, Suécia, Suíça e Brasil. Discute-se a influência dos taludes, ou barricadas, na atenuação da intensidade da onda de sobrepressão.

O Capítulo 3 trata do estudo de caso de uma explosão de um paiol envolvendo massa de explosivo com equivalente a 40 t de TNT. Esse estudo foi baseado em testes realizados pela OTAN no deserto de Woomera (Austrália), apresenta a destruição do paiol em etapas mostrando os momentos e as condições em que são gerados os efeitos de calor, sobrepressão e fragmentação. Discute-se a geração e desenvolvimento da onda de sobrepressão a partir da expansão supersônica dos gases gerados pela detonação dos explosivos. Apresenta-se as etapas em que o calor foi gerado pela reação de combustão da detonação e pela combustão dos produtos inflamáveis finais da detonação. Com

relação aos fragmentos verifica-se a destruição do paiol e o efeito dos taludes na orientação dos mesmos. A interação da onda de sobrepressão com o terreno e uma vidraça também foi discutido.

O Capítulo 4 trata da revisão de um acidente ocorrido em 1964 na oficina de grafitagem de pólvora da Fábrica Presidente Vargas uma relação entre custo de reparos, distância e massa de explosivos. Deste modo, foi feita uma comparação e revisão do trabalho original adotado pelo Departamento de Defesa dos EUA para estabelecimento das distâncias de segurança para residências, cujo critério adotado para a distância de segurança foi patrimonial, diferentemente do Departamento de Defesa do Reino Unido que estabeleceu seu critério na probabilidade de fatalidade.

No Capítulo 5 busca-se um enfoque mais centrado na saúde do ser humano. Apresentando e utilizando correlações estatísticas desenvolvidas para verificar o risco relativo à fatalidade e ferimentos nas vizinhanças das distâncias de segurança adotadas no Brasil e na Europa onde o critério utilizado para a distância de segurança baseia-se na probabilidade de fatalidade e de feridos hospitalizados. Foram verificados aspectos diretos da explosão tais como o efeito da onda de sobrepressão sobre o ser humano, causando hemorragia pulmonar, arremesso do corpo e rompimento de tímpanos, e, como efeitos indiretos o desabamento de residências, a quebra de vidraças e o ruído. Estudos de casos referenciados em diversos atentados a bomba também foram apresentados. A análise da quebra de vidraças procurou relacionar as condições de tipo e tamanho de vidraças com as condições propícias para fatalidade, ferimentos severos e ferimentos leves.

No Capítulo 6 apresenta-se um estudo experimental para quebra de vidraças, motivado pelo fato de que se tem verificado que em condições em que a possibilidade de desabamento for remota, a probabilidade de falecimento estará associada fortemente à quebra de vidraças. A montagem do trabalho experimental consistiu no posicionamento de uma carga pequena de explosivo em frente a uma edificação, a uma distancia variável de uma vidraça fixada em uma moldura especial. Com base neste experimento foi possível identificar aspectos referentes a fragmentação de vidraças como relação entre espessura, impulsão e velocidade inicial de fragmentos, bem como o efeito do arrasto do ar .

No Capítulo 7 foram propostas novas distâncias de segurança. Inicialmente apresentou-se uma análise da legislação brasileira atual considerando os riscos associados aos atuais valores praticados. Em seguida foi proposta uma diferenciação da distância de segurança em relação ao tipo de estabelecimento considerado. O efeito da atenuação pelo uso de taludes foi considerado para cada caso, além de incluir-se na análise o equivalente TNT da massa de explosivo. Os valores obtidos foram então comparados com as demais legislações. Tendo em vista a legislação brasileira, uma proposta de armazenagem foi efetuda baseada no conceito de compartimentalização dos materiais explosivos para adequar os valores de distância de segurança praticados com os valores propostos.

No Capítulo 8, apresentaram-se os aspectos associados aos efeitos psicológicos e de ruido. Aspectos de difícil mensuração tais como falecimentos e ferimentos decorrentes de geração de pânico foram tratados. Tais aspectos são avaliados em conformidade com as distâncias de segurança estabelecidas no capítulo anterior.

Os acidentes envolvendo atmosferas explosivas são muitas vezes traumáticos por surpreenderem devido às intensidades de explosão e destruição. No capítulo 9, trata-se de um caso envolvendo a explosão de um navio de transporte de materiais inflamáveis. Aspectos referentes à evaporação e formação de atmosferas explosivas são tratados em conjunto com análise de sensibilidade a estímulos de ignição. O mecanismo de rompimento interno de tanque é proposto com base na análise termodinâmica e cinética de combustão.

Tendo como motivação a necessidade de se estabelecer distâncias de segurança para casos assemelhados bem como os outros ambientes propícios a formação de atmosferas explosivas capazes de gerar ondas de sobrepressão de grande intensidade desenvolve-se no Capítulo 10, propostas de distâncias de segurança para atmosferas explosivas, baseadas no método multi-energético e no conhecimento da relação entre danos e sobrepressão desenvolvidos nos capítulos anteriores.

Finalmente, no Capítulo 11 tratou-se das conclusões do presente trabalho.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

### 2.1 EXPLOSÕES EM NUVENS DE GÁS/VAPOR

Geralmente, o vazamento de produtos inflamáveis gasosos ou a evaporação de líquidos também inflamáveis causam a formação de uma nuvem, que dependendo das condições de dispersão no meio pode resultar em uma atmosfera altamente explosiva.

Alguns grandes acidentes industriais foram amplamente documentados e são referência da destruição associada a este evento. Van den Berg (2005) apresenta uma vasta revisão de casos, sendo citado, por exemplo, a explosão da unidade de caprolactano da companhia Nypro Ltd em Flixborought (Inglaterra) em primeiro de julho de 1974, bem como a destruição da unidade de cracking de nafta da DSM em BeeK ( Holanda) em 15 de setembro de 1975. Outros acidentes citados como clássicos e apresentados pelo nome da empresa responsável pelo acidente incluem a Celanese ( 1987), a Shell (1988), a Philips (1989) e a Exxon (1989) nos EUA.

Todas as Explosões em Nuvens de Vapor/gás "Vapor Cloud Explosion"-VCE resultam da ignição de uma considerável massa de mistura inflamável, contudo nem toda nuvem inflamável gera uma VCE. Para isso são necessárias algumas condições conforme descritas por Van der Bosh (1997).

Primeiramente, a quantidade de material liberada no vazamento deve ser inflamável nas condições ambientais. Pode-se citar como exemplos substâncias armazenadas na fase líquida em pressões razoáveis tais como propano e butano, gases não liquefeitos como metano, eteno e acetileno e líquidos inflamáveis que processados em condições de alta temperatura e pressão podem ser liberados em forma de vapor produzindo alta taxa de dispersão como ciclohexano e nafta (van der Bosh, 1997).

6

Em segundo lugar, a nuvem deve estar dispersa propiciando condições favoráveis de ignição. Se a ignição ocorrer imediatamente após ao vazamento, ou não houver condições para que haja uma mistura com o ar ambiente, de modo que a concentração se mantenha acima do limite superior de inflamabilidade, a queima ocorrerá lentamente sem a geração de ondas de sobrepressão. Conforme os dados do Conselho Executivo de Segurança e Saúde no Trabalho- "Health and Safety Executive"- HSE, Munns et alli (1998), a ignição costuma ocorrer estatisticamente com atraso de um a cinco minutos após o vazamento, embora existam casos que envolvam alguns segundos bem como períodos acima de 30 minutos .

Em terceiro lugar, parte da nuvem necessita estar dentro do limite de inflamabilidade. Geralmente a nuvem de gás/ vapor pode ser dividida em três regiões. Uma região rica, acima do limite superior de inflamabilidade, próxima do ponto de vazamento. Nesta região, a queima dependerá de processos difusivos envolvendo tanto do ar para chama, como do material combustível para o ar. Devido à dependência do processo de transferência de massa a queima é lenta não desenvolvendo sobrepressão, a chama sendo denominada de difusão. A segunda região compreende a faixa entre os limites inferiores e superiores de inflamabilidade. Nesta região, existe a quantidade de oxigênio para realizar, ainda que parcialmente, a combustão. A gueima é dita pré-misturada e a velocidade de combustão será maior próximo à concentração esteguiométrica. A velocidade de chama pode ser acelerada por aspectos que envolvem confinamento e turbulência, de modo a haver possibilidade de geração de ondas de sobrepressão. A terceira região envolve concentrações abaixo do limite inferior de inflamabilidade. Neste caso, acredita-se que sob intensa radiação térmica oriunda da queima na segunda região pode ocorrer uma queima de misturas até 50% abaixo do limite mínimo de inflamabilidade (Munns et alli, 1998).

Em quarto lugar, os efeitos de sobrepressão produzidos na nuvem de material inflamável dependem da velocidade de propagação da chama. Quanto maior a velocidade maior a sobrepressão gerada, conforme Mercx et alli (1998).

Quando a ignição ocorre a chama produzida se move no sentido de se afastar da fonte geradora. Inicialmente a frente de chama está no regime laminar que para hidrocarbonetos está na faixa de 30 a 60 cm/s. Em tais condições, há formação de onda de sobrepressão de baixa intensidade. Sob tais circunstâncias a nuvem de gás/vapor queima lentamente no que se denomina, "flash fire", como é descrito por Van der Bosh (1998).

Uma condição extremamente relevante para que haja formação de sobrepressão e a presença de turbulência. Esta turbulência pode ser devida a fatores tais como, por exemplo, a interação com obstáculos no caminho percorrido pela chama, ou ao efeito de confinamento por paredes adjacentes entre outros.

Um efeito inverso pode também ocorrer, ou seja, quando uma chama acelerada entra em um ambiente não confinado e sem obstáculos é possível a desaceleração da mesma.

No extremo, a turbulência pode causar uma aceleração local da chama até que seja atingida uma mudança no regime de combustão de modo que a deflagração se transforme em uma detonação. Neste modo de combustão a velocidade de chama excede a velocidade do som (de duas a cinco vezes) atingindo sobrepressões no ar de até 18 bar. Nestas condições o processo de turbulência torna-se inócuo. Cabe ressaltar que, para que haja detonação e esta se mantenha, é necessário que haja uma homogeneidade da mistura gasosa, e que a razão de concentração da mistura esteja na faixa da estequiométrica. Deste modo, uma nuvem de Gás/vapor em regime de detonação como um todo é um fenômeno improvável, ficando o fenômeno limitado a uma fração da nuvem.

A probabilidade de ocorrência de transição de deflagração para detonação é influenciada também pelo processo de ignição. Misturas compostas de hidrocarbonetos-ar necessitam de uma carga de alto poder explosivo, como fonte para uma iniciação direta de uma detonação. Portanto, a deflagração é o processo mais comum de combustão e a detonação é gerada por meio de um processo iniciado com uma deflagração (Mercx et alli, 1998).

O mecanismo de propagação de chama na deflagração é determinado pelos processos difusivos de transferência de massa e condutivos de transferência de energia. Nestas condições pode-se distinguir ainda os regimes de combustão laminar e turbulento.





# Figura 2.1: Diagrama de distribuição de temperatura ao longo de uma chama laminar

A Figura 2.1 ilustra a distribuição de temperatura em uma chama laminar. Verifica-se que o calor é produzido na zona de reação. O calor gerado é transportado à frente na zona de pré-aquecimento por processos difusivos e condutivos, que são processos lentos, (Van der Bosh, 1998)

Denomina-se de velocidade de queima laminar, a velocidade em que a chama se propaga em relação à mistura reativa. Em geral a velocidade da mistura não é zero, pois os produtos aquecidos da combustão se expandem criando um campo de escoamento à frente da chama. A velocidade de chama é tomada como a velocidade da chama relativa aos produtos de combustão.

A Tabela 2.1 apresenta propriedades de temperatura de auto-ignição, velocidade de queima laminar e limite de inflamabilidade de diversos gases/vapores combustíveis no ar.

Gás ou vapor disperso no ar	Limite de inflamabilidade Vol %	Velocidade de queima laminar máxima (m/s)	Temperatura de auto-ignição ( °C )
Metano	5,0-(9,5)-15,0	0,448	595
Etano	3,0 -(5,6)-15,5	0,476	515
Propano	2,1-(4,0)-9,5	0,464	470
Eteno	2,8-(6,5)-28,6	0,735	425
Butano	1,3-(3,1)-8,5	0,449	365
Ргорепо	2,0-(4,4)-11,0	0,512	455
Hidrogênio	4,0-(29,5)-75,6	3,250	560
Ciclohexano	1,2-(2,3)-8,3	0,440	260
Metanol	6,0-(12,4)-36,0	0,460	470

 Tabela 2.1 : Temperatura de auto-ingnição, velocidade de queima laminar e limite de inflamabilidade de gases/vapores de diversos combustíveis no ar

A aceleração da velocidade de chama pode ser melhor entendida através da ilustração da queima em um tubo longo fechado em uma extremidade e aberto em outra.

Considerando que a combustão se inicia na extremidade aberta, a queima ocorrerá de forma que os produtos de combustão se expandirão, sendo ventilados pela abertura do tubo e a velocidade de queima dependerá de processos difusivos e condutivos, de modo que a combustão seguirá lentamente, na velocidade de queima laminar.

Se a ignição ocorrer no interior da extremidade fechada, Figura 2.2 (a), os produtos de combustão gerados irão se expandir "empurrando" a frente de combustão. Neste caso a velocidade de combustão será igual à razão entre as densidades dos produtos de combustão pela dos reagentes vezes a velocidade de chama laminar, (TNO,1998).

Para misturas estequiométricas de hidrocarboneto-ar esta razão de densidades situa-se entre 6 e 9, sendo adotado para efeito de cálculo estimado o valor de 8.

Considerando, que a propagação da queima dentro do tubo sofra perturbações próximas à parede do mesmo, devido às rugosidades ocorrerá no regime laminar à formação de um perfil de velocidades semelhante ao da Figura 2.2 (b), com isto a frente de chama terá uma alteração de perfil.

Assim, a superfície de queima aumenta causando aumento na taxa de combustão, e aceleração no processo de combustão. Deste modo, o escoamento evolui gradualmente para o regime turbulento, com o aparecimento de pequenos vórtices, Figura 2.2 ( c). Tal fenômeno contribui para produção de uma convecção interna, intensificando a mistura dos reagentes com os produtos de combustão aumentando a taxa de transferência de calor e elevando ainda mais a área interna de combustão, Figura 2.2 (d). Com a intensificação da formação de vórtices e aceleração da combustão a velocidade pode atingir um valor próximo à velocidade do som. Assim, o campo de compressão formado conduz à geração de alguns vórtices localmente supersônicos aumentando e disseminando no interior da mistura os pontos de ignição, conforme a Figura 2.2 (e). A onda de sobrepressão, gerada nestes pontos de detonação, interagindo com a tubulação cria ondas de reflexão que, juntamente com as ondas de sobrepressão provenientes dos pontos de detonação, interagem com a frente de chama causando pontos de compressão capazes de causar novas detonações acelerando ainda mais a frente de chama, Figura 2.2 (f). Acima da velocidade do som estes pontos de detonação coalescem numa frente única envolvendo compressão e combustão, evoluindo da deflagração para a detonação, Figura 2.2 (g). Assim ocorre a geração de uma onda de choque auto-sustentada por uma reação química, que é a onda de detonação. Daí, por exemplo, a velocidade de combustão que se iniciou a 0,5 m/s atinge então valores entre 1700 e 2100 m/s com pressão entre 18 e 22 bar, conforme as referencias Van der Bosh (1998).

Figura 2.2 (b). Desenvolvimento de perfil parabólico de frente de chama

Figura 2.2 (c). Desenvolvimento de perfil turbulento de frente de chama

Figura 2.2 (d). Aceleração por turbulência da frente de chama

Figura 2.2 (e). Compressão adiabática - pequenas explosões

Figura 2.2 (f). Concentração de pequenas explosões na frente de chama



Figura 2.2 (g) Coalescimento das explosões onda de choque

Figura 2 visualização de Possível Transição de Deflagração para Detonação Assistida pela Turbulência em Tubo Semi-aberto Van der Bosh (1998)

Deste modo, a existência de turbulência tem um papel fundamental na aceleração da velocidade de queima, primeiramente por seu aspecto de condução de calor e mistura dos gases aumentando a área superficial de queima. Em segundo lugar a turbulência promove nos deslocamentos mais rápidos a formação de centros de compressão adiabáticos que além de acelerar a velocidade de queima podem evoluir para pontos de detonação. A aglomeração desses pontos de detonação em uma frente contínua gera então o regime de detonação que devido ao seu caráter auto-sustentado independe de turbulência.

Assim, os obstáculos presentes na nuvem de gás/vapor atuam como geradores de turbulência. Uma mudança na conFiguração dos obstáculos pode alterar a aceleração do processo, uma redução de turbulência conduz a uma desaceleração. De certo modo a restrição de expansão possibilita aceleração, no caso de deslocamento unidimensional (tubo) e esta é mais acentuada que no caso de duas dimensões ( planos paralelos), que por sua vez é mais acelerada que no caso do deslocamento em três dimensões sem confinamento, conforme é ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3: Mecanismo de Transição de Deflagração para Detonação Van der Bosh (1998)

A intensidade da energia de ignição pode, dependendo de outras variáveis tais como a concentração, conduzir tanto à deflagração quanto à detonação. Geralmente a energia necessária para deflagração se situa na faixa de 10<sup>-4</sup> J/cm<sup>3</sup>, enquanto que a iniciação direta da detonação envolve valores na faixa de 10<sup>6</sup>

J/cm<sup>3</sup>. A Tabela 2.2 a seguir ilustra alguns valores de energia mínima de Ignição para deflagração e detonação.

Combustivel	Mínima Energia (mJ/cm³)			
+ ar	Deflagração	Detonação		
Metano	0,28	2,3 x 10 <sup>11</sup>		
Propano	0,25	2,5 x 10 <sup>9</sup>		
Propeno	0,28	7,6 x 10 <sup>8</sup>		
Eteno	0,07	1,2 x 10 <sup>8</sup>		
Acetileno	0,007	1,29 x 10⁵		

Tabela 2.2: Energia mínima de Deflagração e Detonação Van der Bosh (1998)

Basicamente existem dois grupos de modelos para descrição de explosões tipo VCE. O primeiro grupo quantifica a fonte por uma quantidade equivalente de TNT de forma a utilizar as curvas características de pressão de explosão de TNT. O segundo grupo é de origem mais recente e utiliza ensaios realizados com explosões envolvendo misturas de hidrocarbonetos com o ar para prever as curvas características de pressão e impulsão (Van der Bosh, 1998; Van der Berg, 2005).

O estudo do potencial destrutivo de cargas de TNT e dos altos explosivos é bem descrito na literatura desde a década de 40, conforme Absil et alli (1998), podendo-se citar: Robinson (1944), Schardin (1954), Glasstone e Dollan (1977) e Jarret (1968) são alguns exemplos. Deste modo, uma vez que existe certo conhecimento do potencial de danos de uma carga de TNT é natural que alguns modelos tenham sido elaborados no sentido de aproximar uma VCE para uma carga hipotética de TNT, conforme (Van der Bosh, 1998).

O método de Equivalência de TNT considera que a energia total disponível de combustão pode ser convertida numa carga equivalente de TNT conforme a expressão a seguir:

$$Q_{TNT} = \alpha_{e} \cdot \frac{Q_{f} \cdot E_{mf}}{E_{m TNT}} = \alpha_{m} \cdot Q_{f}$$
(2.1)

Onde:

 $Q_{TNT} = Massa de Equivalente TNT [kg]$   $Q_f = Massa de combustível envolvido [kg]$   $\alpha_e = Equivalência de TNT baseada na energia$   $\alpha_m = Equivalência de TNT baseada na massa$   $E_{mTNT} = Energia de combustão por unidade de massa de TNT [J/kg]$  $E_{mf} = Energia de combustão por unidade de massa de inflamável [J/kg]$ 

Os fatores de equivalência são Tabelados e partem de medidas experimentais, visando relacionar uma massa de explosivo com uma massa de referência de TNT através da análise do perfil da onda de sobrepressão. Como exemplo, pode-se citar o PETN que tem um equivalente TNT de 1,4, conforme Smith (1995). Neste caso, a explosão de 1 kg de PETN gerará um perfil de sobrepressão semelhante ao gerado por 1,4 kg de TNT. Define-se distância escalada ("scaled distance") como a razão, entre a distância em linha reta entre o epicentro da explosão e um ponto, pela raiz cúbica da massa de explosivo, geralmente a massa é convertida para uma massa de referencia de TNT. Assim, OS. métodos baseados no estudo de explosões envolvendo misturas hidrocarbonetos-ar consideram a intensidade da explosão de uma nuvem de gás/vapor. Esses estudos têm demonstrado que as características das curvas de sobrepressão de uma VCE são bastante distintas das que se observam para o TNT. Algumas discrepâncias ocorrem quando se comparam valores de sobrepressão nas proximidades da carga de TNT, onde a sobrepressão atinge 300.000 bar enquanto que uma VCE gera, dependendo das condições, um valor entre 0,01 e 20 bar, ou seja, enquanto o TNT apresenta uma curva padronizada, no caso de uma VCE a curva dependerá da intensidade da explosão que depende de inúmeros fatores e portanto uma larga faixa de possibilidades. Outro problema constitui em representar uma nuvem explosiva por uma carga pontual. Geralmente tal representação só apresenta resultados satisfatórios a uma grande distância. Contudo, o grande interesse está em avaliar os danos nas proximidades da nuvem onde a destruição é mais intensa.

Existem outros fatores de equivalência baseados no desempenho do explosivo tais como fragmentação, produção de crateras e geração de gases entre outros, que não fazem parte dos objetivos deste trabalho.

Como já foi visto, o desenvolvimento de uma VCE depende de fatores ambientais, bem como da presença de agentes que promovam turbulência, além da intensidade de energia da fonte de ignição. Deste modo, a explosão de uma mesma quantidade de material combustível pode causar um efeito diferente devido aos diversos fatores que a influenciam. Portanto, a tentativa de se fixar um equivalente TNT conduziu a diversos resultados ao longo da história. Van den Bosh (1998) apresenta um breve histórico aqui apresentado à seguir.

Brasie e Simpson (1968) e Brasie (1976) recomendaram a utilização de equivalências de TNT de 2% para locais próximos a nuvem e 5% para locais afastados, em combinação com um método para estimar a quantidade de combustível envolvida.

O Conseiho Executivo de Saúde e Segurança do Trabalho – "Health Safety Executive" (1979 e 1986) recomenda um valor de 3% para gases com média reatividade (metano), 6% para gases com reatividade acima da média (Óxido de propeno) e 10 % para gases muito reativos (Óxido de etileno). A massa de material considerada como empregada em combustão é metade da massa liberada no vazamento. Assim, parte da massa se encontra fora da faixa de inflamabilidade.

A máxima pressão considerada é de 1 (bar) e a duração da onda de sobrepressão varia segundo o método entre 100 e 300 ms (Bosh, 1998).

A Exxon (1994) fornece um método para estimativa de material dentro dos limites de inflamabilidade e estabelece um equivalente de 3% para VCE cobrindo terreno plano e 10% para confinamento parcial.

As Seguradoras de Riscos Industriais- "Industrial Risk Insurers" (1990), analisaram dois grandes acidentes e estipularam o uso de equivalente TNT de 2%.

A Direção de Estudos e Pesquisas- "Direction dês Etudes et Recherches, France", Van den Berg e Lannoy (1993), promoveu um amplo estudo em acidentes catalogando 120 danos observados em um total de 23 acidentes. Os resultados apresentaram uma grande variação de equivalente TNT, ou seja, de 0,02% a 15,9%, com média estatística de 3%. Destes, 97% dos casos estavam cobertos por uma equivalência de 10% de TNT, mas para 60% dos casos o equivalente TNT ficou igual ou menor do que 4%. Com base neste trabalho a Autoridade Francesa de Normas de Segurança -"French Authority on Safety Rules" adotou o critério de 10% enquanto que a Industria Química Francesa 'French Chemical Industry" adotou o valor de 4%, ambos baseados na quantidade total de hidrocarboneto liberada.

Alguns modelos foram desenvolvidos com base em testes de explosões de misturas hidrocarbonetos-ar. Van der Bosh (1998) cita como mais relevantes os seguintes:

O modelo de Wiekema (1980) baseado na dinâmica de expansão de uma esfera de gás para simular o efeito de uma VCE. Neste modelo são considerados os efeitos de escala, ou seja, as dimensões da nuvem, além da intensidade da ignição. Neste caso três classes são estabelecidas considerando a reatividade do material inflamável.

Van den Berg iniciou o estudo do método multi-energético em 1985 no TNO (Centro de Pesquisas do Ministério da Defesa da Holanda), e desde então o método vem sofrendo atualizações com base nas pesquisas realizadas no TNO, em investigações de acidentes e nos resultados publicados nos principais periódicos.

Basicamente, o método Multi-Energético subdivide a nuvem de material inflamável em regiões onde são consideradas tanto os graus de confinamento como de obstrução. Assim são consideradas multi-explosões em vez de uma única explosão. Para cada explosão é levada em consideração a energia total da nuvem inflamável na região e com base em fatores relativos à obstrução e ao confinamento são determinadas diversas intensidades de explosão. Cada intensidade de explosão possui uma curva característica própria elaborada após simulação computacional.

A Tabela 2.3 indica como os diversos fatores contribuem para geração da sobrepressão Van der Berg (2005). No caso Prs é a razão entre a pressão resultante e a pressão ambiente.

Tabela 2.3: Categoria de intensidade com respectivos fatores de energia de ignição, Grau de Obstrução e Confinamento por Planos Paralelos, além a sobrepressão resultante Prs

Categoria de	Energia d	e ignição		Obstruça	ão	Planos p	aralelos	Classe	Prs
intensidade	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Nenhuma	Sim	Não		
1		x	X			x		7 a 10	1 a 10
2		x	X				x	7 a 10	_1 a 10
3	x		X			X		5a7	0,2 a 1
4		x		х		x		5a7	0,2 a 1
5		x		х			x	4a6	0,1 a 0,5
6		x			x	x		4a6	0,1 a 0,5
7	x		X		,		x	<u>4a</u> 5	0,1 a 0,2
8		x			x			4a5	0,1 a 0,2
9	×			x		X		3a5	0,05 a 0,2
10	x			х			х	2a3	0,02 a 0,05
11	x				x	x		1a2	0,01 a 0,02
12	x				x		х	1	0,01

De forma geral, os fatores que influenciam a geração de sobrepressão podem ser descritos como:

Obstrução:

Alta: Obstáculos próximos, com distância menor do que 3,0 m e volume bloqueado de 30%, ou seja, a razão entre volume ocupado e volume total superior a 30 %.

Baixa: Razão de volume bloqueado menor do que 30% ou espaços entre bloqueios maior do que 3,0 m.

Nenhuma: Sem obstáculos na nuvem gasosa.

Confinamento por Planos Paralelos:

Sim: a nuvem gasosa ou parte dela está confinada por paredes/ barreiras por dois ou três lados.

Não: A nuvem não se encontra confinada exceto pelo chão.

Intensidade de Ignição.

Alta: A fonte de ignição se encontra parcialmente confinada de forma a liberar um jorro de material incandescente na nuvem inflamável, como exemplo podemos citar tubos, motores não blindados, painéis de controle e salas fechadas, entre outros.

Baixa: A ignição ocorre por faíscas, chama, superfícies quentes entre outros.

Estudos mais recentes, (Van der Berg, 2005) apresentam correlações para estimativas de sobrepressão nos casos de:

- Baixa energia de ignição, nenhum confinamento e presença de obstrução.
- Baixa energia de ignição, confinamento entre placas paralelas e presença de obstrução.

Tais correlações abrangem cerca de 50% das categorias listadas acima.

O método de Baker consiste no uso das curvas de Strehlow (1979) em integração com o método multi-energético. Strehlow forneceu gráficos com base na velocidade atingida pela chama no interior da nuvem.

Baker fornece um método para indicar a intensidade da explosão com base em fatores como volume obstruído e grau de confinamento em uma, duas ou três dimensões. O autor estabelece ainda categorias envolvendo a reatividade do material inflamável. Contudo, nenhuma observação é feita sobre a intensidade da fonte de ignição. A Tabela 2.5 ilustra os valores fornecidos por Backer.

Tabela 2.5: Propo	sta de	Baker	relac	ciona	indo	reatividad	le do materia	al inflamável	com

Expansão de Chama Unidimensional							
	Densidade de obstáculos						
Reatividade	Alta	Média	Baixa				
Alta	>1000 kPa	>1000 kPa	>1000 kPa				
Média	800 kPa	400 kPa	200 kPa				
Baixa	800 kPa	200 kPa	40 kPa				
Expansão de Chama Bidimensional							
	E	ensidade de ol	ostáculos				
Reatividade	Alta	Média	Baixa				
Alta	400 kPa	200 kPa	100 kPa				
Média	300 kPa	120 kPa	7 kPa				
Baixa	120 kPa	70 kPa	4 kPa				
Expansão de Chama Tridimensional							
	Densidade de obstáculos						
Reatividade	Alta	Média	Baixa				
Alta	100 kPa	15 kPa	4 kPa				
Média	20 kPa	7 kPa	1 kPa				
Baixa	15 kPa	7 kPa	1 kPa				

intensidade de obstáculos e confinamento

Os materiais como metano e monóxido de carbono possuem baixa reatividade. Altamente reativos são aqueles cuja velocidade de chama laminar ultrapassa 0,8 m/s como: Hidrogênio, acetileno, eteno, oxido de eteno e óxido de propileno. Os demais são considerados de média reatividade.

A densidade de obstáculos quando baixa contêm 10% de bloqueio, havendo duas ou três camadas. Alta densidade seria bloqueio superior a 40% com camadas próximas.

# 2.2 EXPLOSIVOS SÓLIDOS

Pode-se definir o termo explosão como uma súbita liberação de energia ao ambiente gerando ondas de sobrepressão. Já a onda de sobrepressão pode ser descrita como uma onda de pressão de curta duração e velocidade supersônica gerada pela ação de compressão dos gases provenientes de uma explosão no ar atmosférico. Desta forma, o fenômeno de explosão está associado a um efeito mecânico de expansão de gases conforme Smith et alli (1995).

Alguns materiais, quando sujeitos a um estímulo externo de determinada intensidade, iniciam um processo de decomposição exotérmica rápida, gerando gases a uma elevada temperatura e pressão. Quando este processo ocorre em céu aberto, os gases gerados comprimem o ar atmosférico transferindo a energia cinética da expansão para o ar, gerando um pulso de pressão de alta amplitude e curta duração, conforme esquematizado na Figura 2.4. Tais materiais são comumente denominados de explosivos Smith et alli (1995).

A intensidade da reação de decomposição costuma ser avaliada por meio da velocidade de decomposição do explosivo, que é medida verificando-se o tempo necessário para que ocorra o consumo de um trecho do material. Quando a velocidade de decomposição é maior do que a velocidade do som no material explosivo, tem-se o que se denomina de detonação. Neste caso, o material se decompõe de modo que a reação química ocorre muito rápida e acoplada a uma onda de pressão ou onda de choque (TM-5-1300, 1990).

Cone de Expansão de gases	Frente de Detonação Reação Química Acoplada a Onda de Pressão		
	Material Explosivo		

Figura 2.4: Desenho esquemático da decomposição de um material explosivo.
A primeira composição explosiva que se tem notícia é a Pólvora Negra que se constituí numa mistura mecânica de salitre, carvão e enxofre. Sua descoberta é atribuída a alquimistas chineses em 220 AC. A pólvora negra foi introduzida na Europa no século 13, pelo Monge Inglês Roger Bacon, e seu estudo mais aprofundado foi realizado por Berthold Schwartz em 1320. Este estudo serviu para difundir o uso da pólvora na Europa. Embora a pólvora negra sustente uma reação de combustão bastante rápida de modo a gerar ondas de sobrepressão no ar, durante sua queima não se verifica necessariamente o fenômeno de detonação. Por isto este tipo de explosivo é classificado como baixo explosivo, no mesmo grupo se classificam as pólvoras com base em cloratos e outros propelentes de alta velocidade de combustão (Décio Leão, 2000).

No meio do século 19, as limitações da Pólvora Negra como agente de ruptura de rocha tornaram-se evidentes necessitando um desenvolvimento para se obter um "explosivo melhor". Em 1846 o professor Ascanio Sobrero descobriu a nitroglicerina líquida, mas devido à natureza extremamente sensível da substância a pesquisa foi encerrada. Alguns anos mais tarde o inventor Sueco Immanuel Nobel desenvolveu o processo de produção em escala e em 1863 foi construída a primeira unidade de fabricação em Helenborg perto de Stockolm com seu filho Alfred, (Décio Leão, 2000).

Vinculados à produção de explosivos ocorreram diversos acidentes, inclusive o acidente de 1864 que destruiu a fábrica e matou o irmão de Alfred, chamado Emil.

Juntamente com a história da fabricação e utilização de explosivos se desenvolveu a pesquisa para o estabelecimento de normas de segurança e distância de segurança, (Lyman, 1986).

Existe um número grande de Tabelas que relacionam quantidade de explosivos, com distância para segurança de residências, pessoas, rodovias e ferrovias entre outros. A distância entre a massa de carga explosiva e a edificação é fundamental para determinar os efeitos de pressão e impulsão experimentadas pela edificação. Quando a distância aumenta os valores de pressão e impulsão se reduzem significativamente, reduzindo o risco de danos à edificação. Deste modo, a medida de segurança comumente adotada para o meio ambiente é o afastamento da carga explosiva para que a pressão e a impulsão atinjam valores

dentro de um limite admitido. Outra forma, é a colocação de anteparos resistentes que bloqueie ou reduza a propagação da onda de sobre pressão em determinada direção conforme a, Lyman (1986).

Essas Tabelas de afastamento são denominadas de Tabelas quantidadedistância e sua aplicação dependerá do potencial ameaçador da explosão e do grau de proteção requerido. Devido a aspectos históricos as nações adotam diferentes padrões de distância de segurança. Contudo existe uma tendência para a unificação dos padrões.

O sistema de classificação recomendado para uso internacional pelas Nações Unidas, cito, "Ammunition and Explosives Regulations for Use by the United nations Field Missions", (1998) consiste de nove classes para materiais perigosos. Munições e explosivos estão incluídos na classe 1. Esta por sua vez é subdividida em quatro partes como se segue:

 a-) Classe 1.1 representa explosivos e munições que quando estocados ou embarcados podem apresentar detonação em massa.

b-) Classe 1.2 para explosivos em cargas de fragmentação, como granadas de artilharia. Esta classe apresenta quatro subclasses baseadas em unidade do sistema inglês de distância. Cada subclasse depende da distância com que os fragmentos podem representar uma ameaça.

c-) A classe 1.3 é para materiais que apresentam risco devido à intensidade de chama produzida.

d-) A classe 1.4 é para materiais que apresentam moderado potencial de risco devido à menor intensidade de chama.

e-) A classe 1.5 é para materiais muito insensíveis que possuem explosão em massa . Esta divisão compreende substâncias explosivas que são tão insensíveis que possuem baixa probabilidade de iniciação ou transição de queima para detonação sob condições normais de transporte e estocagem.

Os termos mais empregados para definição das distâncias de segurança são apresentadas a seguir:

 Distância de edificações habitadas –"Inhabited Building Distance"- IBD :
 Esta distância é a mínima permitida entre uma quantidade de explosivo e edificações habitadas, independentemente do tipo de habitação. Esta distância mínima garante alto grau de proteção contra danos estruturais baseados na onda de sobrepressão e no impacto de fragmentos. Contudo não fornece proteção contra quebra de vidros de modo que ferimentos de grande gravidade por fragmentos de vidro são possíveis.

 Distância de rodovias "Public Trafic Route Distance" – PTR": Esta distância é a mínima admitida entre os explosivos rodovias e ferrovias. Seu valor costuma ser de 60% em relação a IBD. A menor distância é baseada na maior resistência que trens e veículos possuem aos efeitos de explosão.

 Distância entre oficinas "Intraline Distances": Esta é a distância mínima permitida entre duas oficinas de fabricação de munição/ explosivos. Seu propósito é evitar a propagação da explosão entre as oficinas.

•Distância de Paiol "Magazine Distance" Esta é a distância mínima permitida entre os paióis de armazenamento, sendo baseada no tipo de construção do paiol e da quantidade de explosivo envolvida. Se baseia na distância para prevenir propagação da explosão pelo efeito da sobrepressão e fornece razoável proteção quanto ao impacto de fragmentos oriundos de explosões.

•Distância de fragmentos "Fragment Distance" Esta distância se aplica a todos armamentos explosivos específicos que podem gerar fragmentos perigosos, (como granadas de artilharia e cargas de fragmentação entre outros). O critério de segurança considera a distância que a densidade de fragmentação contenha menos de um fragmento com energia > 79 Joules por 56 m<sup>2</sup>. Fragmentos com energia menor não são considerados. Esta distância se aplica aos itens de classe 1.2 com quatro subclasses de distâncias: 400 ft (121,92 m), 800 ft (243,84 m), 1200 ft (365,76 m) ou 1800 ft (548,64 m). Sendo os valores mencionados utilizados também para posicionar a distância de edifícios habitados com relação aos itens tipo 1.2. Esta distância serve ainda para proteger indivíduos em campo aberto quanto à ameaça de fragmentos perigosos (energia > 79 joule por 56 m<sup>2</sup>).

Segundo Lyman (1986) as Tabelas de quantidade-distância para edificações habitadas (IBD) nos Estados Unidos tiveram sua gênese em 1909, sendo denominada naquela época de Tabela Americana de Distâncias - "American Table of Distances". Naquele ano o Coronel B. W. Dunn, Inspetor Chefe do Escritório de Explosivos- "Bureau of Explosives" representando a Associação Ferroviária Americana - "American Railroad Association" chamou a atenção dos fabricantes de explosivo dos Estados Unidos para uma situação potencial de risco, que consistia na proximidade entre depósitos de explosivos e as linhas ferroviárias. Na ocasião o Coronel Dunn demonstrou a necessidade de mudanças radicais, o que levou a Associação Americana de Fabricantes de Pólvora e Explosivos a constituir um comitê para estudar o problema. Algumas legislações estrangeiras foram examinadas e uma extensa investigação sobre acidentes envolvendo explosivos pelo mundo foi realizada. Inicialmente os dados compilados apresentavam uma relação entre quantidade de explosivos envolvidos em um acidente e a distância na qual o dano se estendeu visualmente. Foram avaliados 122 acidentes com explosivos ocorridos entre os anos de 1864 e 1914.

Como resultado desse estudo foi publicada a Tabela Americana de Distâncias -"American Table of Distances" fornecendo as distâncias mínimas permissíveis para edificações habitadas (IBD) até a quantidade de 1.000.000 libras (~500.000 kg). Na ocasião foi observado que os dados podiam ser ajustados segundo uma equação que consistia de uma constante vezes a raiz cúbica da massa do explosivo. Como esta constante era representada pela letra K, com o tempo costumou-se a chamar-se esta constante de fator K de segurança.

Durante a compilação dos dados das explosões acidentais, teve-se o cuidado de separar aqueles em que havia alguma proteção na fonte explosiva do tipo barricada, fosse natural ou artificial, daqueles em que não havia qualquer tipo de proteção. Isto conduziu à interessante observação de que, quando a fonte explosiva possuía proteção do tipo barricada, a distância de segurança era metade do caso de fonte sem barricada. A distância para ferrovias foi tomada como 60% da distância para edificações habitadas e para distância de vias públicas o valor correspondeu ao da metade daquela para ferrovia. Mais tarde a distância de vias públicas assumiu o mesmo valor do de ferrovias. A seleção de 60% foi arbitraria e a razão foi dada pela seguinte citação de Assheton conforme Lyman (1986):

"... Após cuidadosas considerações foi concluído que distâncias razoavelmente seguras para ferrovias seriam obtidas tomando-se 60% do valor das distâncias de segurança para edificações habitadas, sendo as razões para esta conclusão as seguintes":

24 \_\_\_\_\_

A menor altura e menor área dos carros da ferrovia expostos para resistir a concussão quando comparados com as edificações.

O fato de que enquanto as edificações são estacionárias e sujeitas a ríscos de forma constante, a presença do trem é somente temporária."

A Tabela Americana de Distâncias -"American Table of Distances" entrou em vigor em 1915. O estado de New Jersey adotou-as como lei estadual em 1925 e os Estados Unidos a adotaram em 1928 após o acidente do lago Denmark, o qual marcou incidentalmente o início do que é hoje o Conselho de Explosivos e Segurança do Departamento de Defesa Americano -"Departament of Defense Explosives Safety Board".

O aspecto mais significativo em relação à Tabela publicada em 1915 é que apesar da grande dispersão de dados e da avaliação subjetiva com que os dados foram tratados devido a inexistência de fundamentos teóricos, as distâncias estão bem próximas dos valores reais. As Tabelas permaneceram sem mudança por muitos anos. De fato esta Tabela é exatamente a mesma publicada em 1942 no Livro Texto da Escola de Material Bélico do Exército Americano- "US Army Ordnance School Text" e em 1960 no Manual de Manuseio de Explosivos "Explosives handling Manual".

Em 1945 o Coronel C. S. Robinson que estava servindo no Conselho de Explosivos e Segurança do Exército e Marinha –"Army/Navy Explosive Safety Board" publicou um relatório no qual este questionava a precisão das Tabelas de quantidade distância para edificações habitadas. Sua preocupação básica consistia nas distâncias para grandes cargas explosivas, pois ele acreditava que as distâncias especificadas eram inadequadas. Ele também postulava que os modernos explosivos por possuírem mais energia por unidade de massa deveriam receber uma distância maior do que a especificada, (Lyman, 1986).

A preocupação referente a danos causados por acidentes envolvendo grandes cargas de explosivos se baseava nas avaliações dos acidentes ocorridos no Porto de Chicago e em Hastings em 1944. Ambos os acidentes envolveram torpex (TNT+Alumínio em pó), que como já era sabido, era mais sensível que o TNT e possuía maior efeito relativo. O Coronel Robinson questionava também o

efeito da barricada como atenuante em acidentes envolvendo grandes quantidades de explosivos.

Assheton notou em 1930 que os valores da Tabela Americana de Distâncias - "American Table of Distances" poderiam ser ajustados por uma constante multiplicando a raiz cúbica da carga explosiva como já mencionado, com base nisto ele elaborou um estudo com oitenta acidentes verificando este comportamento. Uma relação de experimentos controlados com o cuidado de se verificar a sobre pressão desenvolvida validaram o conceito de danos relativos a distância escalada, ou seja, que a razão entre a distância do dano dividida pela raiz cúbica da massa da carga de explosivo podia ser aproximada por uma constante. A proteção contra os efeitos de explosão passou a ser baseada na distância escalada.

Após a segunda guerra mundial foi intensa a pesquisa relativa aos efeitos de explosões em laboratórios do governo americano. A efetividade da adoção de barricadas na redução das pressões oriundas de explosões foi tópico de grandes debates. O Conselho de Segurança e Explosivos das Forças Armadas - "Armed Forces Explosives Safety Board" providenciou uma série de experimentos para coletar dados sobre este assunto.

Inicialmente houve dificuldade para desconsiderar o efeito de proteção das distâncias barricadas por parte da Agencia de Suporte de Defesa Atômica-"Defense Atomic Suport Agency" (DASA) em 1966. O debate prosseguiu até 1968, sendo que a relutância para abandonar o conceito de que paióis barricados podem reduzir as distâncias de segurança para edificações habitadas era bem evidente. O relatório de 1968 apresenta um bom sumário dos dados disponíveis e uma bibliografia bem completa pertinente às diversas fontes consultadas. A análise de dados concluía que barricadas provavam ser menos efetivas a distâncias maiores que 5 a 8 vezes a altura da barricada, conforme suposto na Figura 2.5. Como conseqüência foram abolidas as reduções da distância entre a paióis para Edificações habitadas devido a existência de barricada.



Figura 2.5: Efeito da barricada ou talude na atenuação da sobrepressão Lyman (1986)

Em 1959 o Ministério da Defesa Inglês publicou um trabalho realizado por D. E. Jarret derivado do estudo de casos de danos a edificações sofridos durante os bombardeios da segunda guerra mundial na Inglaterra, Smith (1995). Este estudo foi a base para definir as distâncias de segurança na Inglaterra. O ajuste obtido possui tal confiança que até hoje é utilizado com razoável confiança para prever danos em estruturas semelhantes. Com este trabalho ficou evidente que os danos não devem ficar restritos à associação com uma pressão e sim com um modelo envolvendo pressão e Impulsão.

Desta forma a distância escalada foi substituída por diagramas pressãoimpulsão como critério de estimativa de danos. O trabalho produzido por D.E. Jarret pode ser resumido da forma descrita na Tabela 2.6, (Smith, 1995). Tabela 2.6: Descrição da categoria de danos, Smith (1995)

Categoria de Danos	Descrição de danos
А	Casas completamente demolidas, i.e., com mais de 75% das paredes externas demolidas.
В	Casas bastante danificadas que estão além de reparos necessitando serem demolidas quando houver oportunidade. A propriedade é incluída nesta categoria se 50-75% das paredes externas for destruída, ou em caso menos severo de destruição, as paredes remanescentes apresentam rachaduras, condenando-as.
Сь	Casas que permanecem inabitáveis pelos danos causados, necessitando de bastante reparo só possível no pós-guerra. Exemplo de danos incluem total colapso do telhado, demolição parcial ou total de parede externas até 25 % do total.
Са	Casas que permanecem inabitáveis, mas podem ser razoavelmente reparadas durante a guerra, o dano sofrido não compromete a integridade estrutural das paredes, as divisórias de madeira são danificadas, havendo danos nos batentes de portas e janelas, pequena parte da estrutura do telhado comprometida e telhas arrancadas em mais de 25 % do telhado.
D	Casas requerendo reparos, mas permanecendo habitáveis. Residências nesta categoria apresentam pequenos danos nos telhados, nas telhas, e menor efeito de fragmentos nas paredes com quebra de vidros nas janelas sem comprometimento dos batentes. Casas cujas janelas quebradas representarem <10 % do total de janelas não estão incluídas.

A correlação dos dados relaciona a massa do explosivo Q [kg], e a distância do epicentro D<sub>E i</sub> [m], para uma relativa categoria de danos é dada por:

$$D_{E_{i}} = \frac{kciQ^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{3175}{Q}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{6}}}$$
(2.2)

Onde  $kc_i = 4,8$ , 7,1, 12,4, 21,3 e 42,6 para as categorias A, B, Cb, Ca and D, respectivamente com unidade de m/kg<sup>1/3</sup>.

Como já foi discutido, uma análise da correlação proposta mostra que quando a carga tende a valores muito elevados a distância do dano dividida pela raiz cúbica da massa da carga de explosivo tipo TNT pode ser aproximada por uma constante, ou seja, o dano se aproxima a uma distância escalada. Contudo tal aproximação não é valida para cargas relativamente elevadas.

Em 1970 a OTAN adotou como critério de risco baseado no trabalho Inglês de 1959, o valor da constante kci= 21,3 m/kg<sup>1/3</sup>, ou seja, categoria de risco Ca.

A correlação inglesa mostrou que, para melhorar a previsão de danos a um alvo específico, não bastava somente o valor da sobrepressão exercido sobre o alvo. Uma atenção maior foi dada a modelos do tipo pressão-impulsão. Sewell (1964), Johnson (1967) e Baker (1975) desenvolveram modelos a partir do conceito de pressão-impulsão para prever danos a edificações e em veículos. Neste caso o conceito relacionado a danos em veículos consistiu no critério de capotagem de veículos, ou seja, em condições onde a pressão-impulsão é capaz de virar o veículo.

Na Inglaterra a primeira legislação para explosivos (Explosives Act) data de 1875 Em 1925 foi formado o Comitê de Estocagem e Transporte de Explosivos -"Explosives Storage and Transport Committee (ESTC)" este ultimo é o responsável pela padronização e prescrição de normas de segurança para fabricação, estocagem e transporte de explosivos pelo Ministério da Defesa Inglês ( Ministery of Defense). O ESTC em 1959 publicou o trabalho de D.E. Jarret e desde então tem realizado avaliação de acidentes e experimentos para atualizar seus dados. Recentemente o ESTC realizou no deserto de Woomera (Austrália) uma série de ensaios para coleta de dados. Em 1999 foi realizada uma detonação contendo 40 ton de equivalente TNT para verificação de danos em casas, manequins e veículos.

Na França não havia uma lei específica antes de 1955 para proteger os trabalhadores dos riscos envolvidos nos estabelecimentos de fabricação de pólvoras, pirotécnicos e explosivos. O desenvolvimento da legislação francesa sofreu bastante influência do trabalho desenvolvido por Jarret, conforme Amiable (2002). Neste País o conceito de zona de perigo para explosivos 1.1 apresenta a descrição na Tabela 2.7.

Designação de Zona	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z4	Z <sub>5</sub>
Prováveis danos pessoais	Falecimento em mais de 50% dos casos	Lesões que podem causar morte	Lesões	Possibilidades de lesões	Possibilidades pequenas de lesões leves
Prováveis danos a propriedade	Danos muito sérios	Danos sérios	Danos médios	Danos leves	Danos muito leves
Distância R da carga	0 <z<sub>1&lt; 3 Q<sup>1/3</sup></z<sub>	$< Z_2 < 8 Q^{1/3}$	< Z <sub>3</sub> < 15 Q <sup>1/3</sup>	< Z <sub>4</sub> < 22 Q <sup>1/3</sup>	< Z <sub>5</sub> < 44 Q <sup>1/3</sup>

Tabela 2.7: Classificação da legislação Francesa (Amiable, 2002)

Segundo Sigbjorn (2002) a legislação Norueguesa que entrou em vigor em 1 de janeiro de 2000, apresenta para altos explosivos a Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Dados da Legislação Norueguesa (Sigbjorn, 2002)

Distância em metros para: Hospitais , escolas , jardins de Infância Creches	Distância em metros para residências domésticas <sub>1</sub>	Distância em metros para ruas públicas, ferrovias,m cais e embarcadouro	Distância em metros entre Paióis com barricadas	Distância em metros de paióis sem barricada
K= 44,4,n=1/3	K= 22,2, n=1/3	K= 14,8, n=1/3	K= 2,4, n=1/3	K= 22,2, n=1/3
Distância	Distância mínima	Distância	Distância	Distância
mínima ≈ 800 m	= 400 m	mínima =180 m	mínima = 8 m	mínima = 180 m

O DoD 6055.9 - Princípios de Segurança com Munições do Departamento de Defesa Americano-"Department of Defense Explosive and Ammunitions Safety Principles" em (2002) apresenta a seguinte Tabela para distâncias de segurança envolvendo explosivos de classificação 1.1.

Posição	Distância Escalada ( m/kg <sup>1/3</sup> ) Fator-K	Pressão incidente ( kPa )
Distância entre oficinas sem barricadas (IMD)	4,36	55,2
Distância entre oficinas com barricadas (IMD)	2,38	186,2
Distância entre Paióis sem barricadas (ILD)	7,14	24,1
Distância entre Paióis com Barricadas (ILD)	3,57	82,7
Distância de Rodovias (PTR) Q < 45.400 kg 45.400< Q < 113.400 kg	9,52 11,9	15,9 11,7
Distância até edificações habitadas (IBD) Q < 45.400 kg 45.400< Q < 113.400 kg	15,87 19,84	8,3 6,2

Tabela 2.9: Distâncias de Segurança extraídas do DoD 6055.9 (2002)

As prováveis conseqüências de uma explosão envolvendo grande quantidade de explosivos são resumidas no DoD 6055.9 da seguinte forma:

1. Distâncias entre oficinas com Barricada (2,4 Q<sup>1/3</sup>) - Nesta distância:

Edificações não reforçadas são demolidas.

• O pessoal pode ser morto pela onda de sobrepressão causando rompimento pulmonar, por fragmentos da oficina ou pelo deslocamento da sobrepressão causando arremesso contra uma superfície rigida.

 Veículos de transporte serão arrastados e virados além de serem esmagados pela sobrepressão.

 Vasos metálicos contendo explosivos serão seriamente danificados com possibilidade de propagação de explosão.

 Aviões são destruídos pela onda de sobrepressão, pela frente de chama ou pelos fragmentos

A utilização de barricadas é efetiva contra a imediata propagação da explosão por fragmentos de alta energia cinética e baixo ângulo de arremesso. 2. Distância entre paióis com barricada (3,6 Q<sup>1/3</sup>)

 Edificações não reforçadas sofrem severo dano estrutural tendendo para total destruição.

 Pessoal sujeito a lesões severas ou morte devido ao efeito da onda de sobrepressão, colapso de edificação ou arremesso.

• Aviões são danificados além do reparo econômico tanto pela sobrepressão como pelos fragmentos.

 Veículos de transporte serão danificados severamente com provável perda total.

• Barricadas mal construidas podem aumentar o risco de arremesso de fragmentos.

 O uso de barricadas impede a propagação direta entre os paióis e oferecem proteção quanto a fragmentos de alta energia cinética.

3. Distância entre oficinas sem barricada (4,4 Q<sup>1/3</sup>):

 Edificações não reforçadas sofrem severo dano estrutural tendendo para total destruição.

• Pessoal sujeito a lesões severas ou morte devido ao efeito da onda de sobrepressão, colapso de edificação ou arremesso.

Existe 15 % de risco de ruptura dos tímpanos.

 Vasos metálicos contendo explosivos serão seriamente danificados com possibilidade de propagação de explosão.

• Aviões são seriamente danificados existindo probabilidade de incêndio.

• Veículos de transporte serão danificados severamente poucos danos no motor, mas completa quebra de vidros.

 O uso de barricadas impede a propagação direta entre os paióis e oferecem proteção quanto a fragmentos de alta energia cinética.

4. Distância entre paióis sem barricada (7,2 Q<sup>1/3</sup>):

Propagação direta da explosão não é esperada.

 Danos a edificações não reforçadas podem chegar a 50% ou mais do custo total da edificação.

Existe 2 % de chance de ruptura nos tímpanos.

Aviões sofrem danos estruturais severos.

 Veículos terão o vidro quebrado e a chapa metálica amassada, contudo o motor sofre pequenos danos permanecendo em condições de funcionamento. 5. Distância de Rodovias (PTR) (9,6 Q<sup>1/3</sup>).

• Danos a edificações não reforçadas podem chegar a 20% do custo total da edificação.

• Existe possibilidade de perda de audição temporária.

• Embora não haja previsão de falecimento por efeito da onda de sobrepressão, os fragmentos oriundos da explosão podem causar lesões sérias.

• Aviões podem sofrer danos sérios na fuselagem inclusive com a penetração de fragmentos, mas permanecem operacionais com necessidade de pequenos reparos.

 Veículos na rua sofrem danos pequenos, sem que haja quebra de vidros pelo efeito da onda de sobrepressão. Entretanto, o deslocamento de ar pode levar à perda de controle na direção e fragmentos podem causar maiores danos ao veículo.

• O uso de barricadas reduz o risco causado por fragmentos em pessoal e veículos.

6. Distância de Edificações habitadas (15,9 Q<sup>1/3</sup>).

• Danos a edificações não reforçadas podem chegar a 5 % do custo total da edificação.

 As pessoas dentro das edificações estão protegidas contra os efeitos de fragmentação e onda de sobrepressão de forma que não se espera que haja falecimento, contudo existe a possibilidade de ferimentos devido aos efeitos secundários da explosão como quebra de vidro e queda de pequenos fragmentos da edificação.

• Os pilotos de avião podem perder o controle enquanto taxiam na pista e bater com o avião.

 Enquanto os danos previstos relativos à sobrepressão são pequenos os fragmentos gerados na explosão representam probabilidade de dano que dependerá das características do fragmento.

• O uso de barricadas reduz muito o risco causado por fragmentos em pessoal e veículos.

O Ministério da Defesa Inglês elaborou para 2004 novas prescrições para paióis contendo pequenas quantidades de explosivos, conforme Merrifield (2004). Conforme descrito a seguir.

IBD (Distância de edificações habitadas –"Inhabited Building Distânce" - IBD com barricadas):

Paióis em áreas de baixa densidade populacional:

$$IBD=0,2176 Q + 95,9167$$
para  $25 < Q < 500$ (2.3) $IBD=204$ para  $500 = Q < 1647$ (2.4)

para 500 = Q < 1647 (2.4)

$$|BD = \frac{22,4Q^{1/3}}{[1+(3175/Q)]^{1/6}} \qquad \text{para} Q \ge 1647 \tag{2.5}$$

Sendo Q dado em kg e IBD em m/kg<sup>1/3</sup>

Paióis em áreas densamente povoadas:

$$\mathsf{IBD} = \frac{73,84\,\mathrm{Q}}{-3,364+\mathrm{Q}} + \frac{249,2\,\mathrm{Q}}{413,1+\mathrm{Q}} \qquad \mathsf{para} \ 25 < \mathrm{Q} < 3204 \tag{2.6}$$

$$\mathsf{IBD} = \frac{22,4Q^{1/3}}{\left[1 + (3175/Q)\right]^{1/6}} \qquad \mathsf{para} \, Q \ge 3204 \tag{2.7}$$

As novas prescrições baseiam se em critérios de risco em detrimento do potencial de perigo, ou seja, levam em consideração tanto a probabilidade da ocorrência do evento como as consegüências potenciais. As novas prescrições substituem as regras para quantidade-distância que estão em vigor e que foram publicadas em 1959.

Foram duas as razões que levaram a esta mudança legislativa. A primeira deriva dos resultados dos testes realizados pelo ESTC na Austrália que mostraram claramente que pequenas explosões em construções de tijolo/concreto podem produzir consideráveis quantidades de fragmentos de modo que o perigo relacionado a fragmentação pode superar o dano causado pelas ondas de sobrepressão, de forma que algumas distâncias baseadas somente no critério de sobrepressão apresentariam sérios riscos devido aos efeitos dos fragmentos lançados pela explosão. A segunda razão consiste que as distância existentes não consideram o número de pessoas (densidade populacional) envolvidas no risco, ou seja, as distâncias anteriores eram aplicáveis tanto em zonas urbanas densamente povoadas como em locais de baixa densidade populacional.

# Capítulo 3

# Estudo de Caso 1 - Explosão de Paiol com Massa Equivalente a 40 Ton de TNT

#### 3.1 HISTÓRICO

No final da década de 80 O Comitê de Transporte e Estocagem de Explosivos do Reino Unido "United kingdom Esplosives Storage and Transport Committe (UK ESTC)" juntamente com o grupo de estudo da OTAN AC/258 ( hoje AC/326- envolvendo Holanda, Alemanha, Dinamarca, Noruega) iniciaram um programa experimental para pesquisar as explosões e seus efeitos. Posteriormente a eles se juntaram o Departamento de Defesa dos EUA através do DDESB e o Departamento de Defesa Australiano.

O local de testes foi uma área restrita no Deserto de Woomera na Austrália, durante muito tempo o trabalho se concentrou na resposta estrutural de explosões internas e adjacentes a paióis do tipo iglu, com reduzido trabalho dedicado aos efeitos de explosões em edificações. Contudo a partir do final da década de 90 começaram a se desenvolver testes objetivando a verificação de efeitos em residências, automóveis, manequins e taludes entre outros. Em 2000 realizou-se a detonação de uma carga com equivalente a 40 t de TNT. Em 2002 testou-se 27 ton de equivalente TNT e no ano de 2004 uma série de testes com 5 t de TNT. Neste último caso foram verificados os efeitos dentro de instalações militares.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO EVENTO

As imagens da explosão de 40 t de equivalente TNT realizadas no ano de 2000 foram cedidas pelo diretor do Comitê de Estocagem e Transporte de Explosivos-"Explosives Storage and Transport Committee (ESTC)".

Na Figura 3.2 apresenta-se a seqüência de eventos na explosão de paiot realizada no deserto de Woomera, Austrália. A Figura 3.2 (a) apresenta uma visão do paiol por uma câmera de vídeo a uma distancia de 752 metros. Esta distância foi escolhida por ser a distância de segurança adotada para edificações habitadas.

A Figura 3.2 (b) mostra o primeiro slide captado pela câmera da explosão. No momento em questão, aparece uma meia esfera de luminosidade muito intensa, tal imagem é comumente denominada de aparecimento da esfera de fogo ( fire ball). Neste caso os gases gerados pela combustão do explosivo estão se expandindo devido as condições dos produtos de combustão de elevada pressão e temperatura.

A expansão como esperada ocorre aparentemente sem um sentido preferencial, pois a pressão é tão elevada que o efeito de compressão rompe todos os obstáculos adjacentes, dando um aspecto de movimento semelhante em todas as direções. Durante este evento a onda de sobrepressão se situa na frente de deslocamento dos gases de combustão. A velocidade de expansão, neste caso, é maior do que a velocidade de arremesso dos fragmentos. Segundo Merrifield (2000) o diâmetro desta esfera de fogo foi bem descrito pela equação:

A duração desta "bola-de-fogo" é curta, pois a medida em que ocorre a expansão os gases se resfriam e a pressão se reduz, Figura 3.2( c ), causando uma redução na velocidade de expansão dos produtos da combustão. Neste momento ocorre o descolamento da onda de sobrepressão da superfície da frente de expansão dos produtos de combustão. Em decorrência disso, a sobrepressão passa a se propagar no ar atmosférico num tipo de "pulso" de pressão, conforme representamos na Figura 3.1.



Figura 3.1: Modelo de histórico de sobrepressão, aparência de um "pulso" de pressão

Com a redução da velocidade de expansão dos gases e redução da pressão interna a nuvem gasosa perde o aspecto de homogeneidade e se torna disforme, Figuras 3.2 (d), (e) e (f).

Como a combustão ocorrida na detonação do explosivo não é completa, uma vez que não há moléculas de oxigênio suficientes para realizar uma oxidação de todo o combustível existem nos produtos de combustão compostos totalmente oxidados como vapor d'água e gás carbônico bem como compostos ainda inflamáveis tais como: Hidrogênio, carbono, monóxido de carbono, ácido cianídrico entre outros. Estes compostos em contato com o ar geram a combustão secundária e uma segunda bola de fogo de duração maior do que a primeira Smith (1998).

Cabe ressaltar, que no caso de explosivos comerciais, em que a relação de oxigênio é suficiente para produzir produtos com combustão completa, a combustão secundária não é percebida e a "fumaça" é branca ao contrario da intensa fumaça preta oriunda da combustão do TNT. Isto ocorre com explosivos tipos dinamite, emulsão explosiva entre outros. Para explosivo tipo nitrato de amônio e óleo combustível (ANFO) a fumaça costuma ser cinza claro, uma vez que a quantidade de óleo combustível recomendada é ligeiramente acima da quantidade estequiométrica Smith (1998).

37

A Figura 3.2(d) apresenta o lançamento dos fragmentos para o alto, a nuvem de fuligem escura é arrastada na esteira dos fragmentos, daí o aspecto de pontas voltadas para o alto.

A grande quantidade de fragmentos arremessada para o alto se justifica primeiramente pela geometria do paiol, que apresentava uma área de cobertura maior do que a área lateral, mas principalmente pela presença dos taludes que contiveram os fragmentos arremessados em ângulos mais baixos do que 73<sup>0</sup>.

Este experimento comprovou a eficiência dos taludes indicando que os fragmentos que não foram contidos possuíram ângulo de arremesso maior do que 73<sup>0</sup>, e, portanto, os pedaços caíram mais próximo do paiol restringindo a área atingida.

A Figura 3.2(g) apresenta uma outra tomada de imagem enfatizando o aspecto do lançamento de fragmentos para o alto.

Na Figura 3.2(e) pode ser verificada a continuação da queima secundária com aumento e subida da bola de fogo, além disso, pode-se perceber que ao contrário das Figuras anteriores aparece uma nuvem rasteira de pó sobre a areia do chão. Esta nuvem é constituída de areia que foi arrastada (soprada) pela onda de sobrepressão.

Assim, o efeito térmico se inicia antes da chegada da onda de sobrepressão e terminando após esta ter se dissipado.

Na Figura 3.2 (f) os fragmentos estão caindo adjacentes à câmera. O tamanho dos fragmentos recolhidos variou bastante desde gramas a centenas de kg. O potencial de risco foi tomado considerando fragmentos com massa maior do que 100 gramas.

A sequência resumida dos eventos entre as Figuras 3.2 (a) e 3.2 (f) é:

- Destruição do paiol com formação de meia esfera de fogo e presença da onda de sobrepressão na superfície dos gases em expansão 3.2 (b).
- Descolamento da onda de sobrepressão, juntamente com redução de velocidade dos gases. Início da combustão final dos produtos gerados na decomposição dos explosivos. Velocidade dos fragmentos é maior do que a velocidade de expansão dos gases 3.2 (c).

- Propagação dos fragmentos para o alto e continuação da combustão Figura 3.2 (d).
- Chegada da onda de sobrepressão, bola de fogo formada se desloca para o alto.
- 5. Queda dos fragmentos Figura 3.2 (f).

Desta forma, uma vez que a onda de sobrepressão caminha supersonicamente, não existe uma distinção entre o "barulho" da explosão e a onda de sobrepressão. Na realidade o "barulho" é uma medida da intensidade da sobrepressão.

A recomendação de que ao ouvir o "barulho" da explosão as pessoas que estiverem abrigadas esperem para sair pelo menos 30 segundos, se justifica pela comprovação do fato dos fragmentos cairem após a chegada da sobrepressão.

O talude é bastante eficiente e garante que os fragmentos sejam lançados em ângulo acima de 73<sup>0</sup>.

A Figura 3.2 (h) apresenta uma tomada aérea do paiol e a Figura 3.2(i) apresenta a explosão com lançamento de fragmentos e propagação da onda de sobrepressão.

Com relação à propagação da onda de sobrepressão radialmente ao epicentro percebe-se que a onda se propaga no solo em uma forma assemelhada a um circulo. Se o talude reduzisse a sobrepressão à metade como se supunha então haveria redução significativa de velocidade e então a onda deveria se propagar elipticamente, o que não se verificou.

A Figura 3.2 (j) apresenta uma tomada vista de satélite. As distribuições de fuligem e material em chamas não foi homogêneo, apresentando um estreitamento no meio, isto ocorreu devido ao efeito de retenção dos taludes.

A Figura 3.2 (k) apresenta uma janela voltada na direção da explosão a uma distancia que é a metade da distância de segurança. Seu objetivo era verificar o efeito atenuador do talude. Na Figura (I) apresenta-se uma intensa fragmentação de vidros como resultado da interação da onda de sobrepressão com a janela.



Figura 3.2 (d) Lançamentos de fragmentos



Figura 3.2( c) Nuvem gasosa



Figura 3.2 (e) Queima secundária + Fire ball



Figura 3.2 (f) Queda de fragmentos



Figura 3.2(g) Lançamento de Fragmentos



Figura 3.2 (h) Vista Aérea





Figura 3.2(i) Onda de Sobrepressão





Figura 3.2 (l) Janela 1



Figura 3.2 (m) Janela 2

42 \_\_\_\_\_

## Capítulo 4

# Estudo de caso 2- Explosão de 1964 na Fábrica Presidente Vargas

#### 4.1 HISTÓRICO

Como já foi visto na revisão bibliográfica, os critérios de distância de segurança para habitação seguem nos EUA o trabalho de Wilson e Gabrielsen (1974) apresentado na referencia, na Europa o trabalho de Jarret, conforme Smith(1995), e no Brasil utiliza-se a Tabela Americana de Distancias -"American Table of Distances" desenvolvida nos EUA em 1914, anteriormente aos trabalhos de Wilson (1974).

O trabalho de Jarret, segundo Smith (1998), consistiu na análise de destruição de edificações durante a segunda guerra mundial pelo bombardeio de Londres. O critério de distância adotado baseou-se na reduzida possibilidade de falecimento. Deste modo, aspectos como prejuízo financeiro, existência de feridos necessitando hospitalízação, tipos de construção, entre outros, não foram considerados.

Já o trabalho de Wilson e Gabrielsen (1974), baseia-se no critério financeiro de reparos em uma habitação feita com madeira, não considerando aspectos relativos à condição humana tais como falecimento e ferimentos entre outros.

Para estabelecer uma relação entre os trabalhos de Jarret e os de Wilson e Gabrielsen partiu-se da análise de uma explosão ocorrida em 1964 que foi bastante documentada e envolveu construções de alvenaria. Inicialmente classificou-se as construções danificadas conforme o critério de Jarret. Com isto determinou-se a massa de equivalente de TNT relativa à destruição. Com base na massa de explosivo e considerando a descrição dos danos montou-se uma relação de distância e prejuízo financeiro para a construção de alvenaria.

# 4.2 - AVALIAÇÃO DA CARGA EQUIVALENTE DE TNT

#### 4.2.1 Descrição do Método

Os danos à edificação são detalhados por Mendonça-Filho et alli (2002). A destruição ocorreu dentro de um raio de 1,500 metros do epicentro da explosão. As informações e fotos fornecidas serão utilizadas como base para elaborar um perfil de destruição de edificação.

O método para avaliação deste perfil baseia-se no trabalho de D.E. Jarret publicado em 1959, (Smith, 1998), que classifica os danos sofridos por uma edificação em cinco categorias e cada categoria é individualizada com base na severidade dos defeitos estruturais.

Os defeitos estruturais mais evidentes baseiam-se nos estragos das paredes e telhados. Assim, considerando os estragos nas paredes e telhados como os aspectos mais relevantes para descrição do perfil de destruição pode-se propor uma gradação de estragos conforme o seguinte esquema:

Paredes Externas :	Demolição completa da parede Demolição parcial de parede Paredes rachadas
	Colapso total Colapso Parcial Celhas arrancadas
Telhados : {	Felhas remexidas
	reinas trincadas Felhas de asbestos arrancadas

Este procedimento permite classificar os danos às paredes externas em três classes, e os danos aos telhados em seis classes respectivas, cada uma ordenada da mais severa para menos intensa. Pode-se propor que a relação de danos a paredes e a telhados pode ser relacionada a uma respectiva classe de danos proposta por Jarret segundo a Tabela 4.1.

# Tabela 4.1: Relação entre categoria de danos e descrição de danos a paredes e telhados Mendonça-Filho et alli (2002)

Categoria de Danos	Paredes Demolidas	Demolição Parcial	Paredes trincadas	Colapso do telhado	Colapso parcial do Telhado	Telhas arrancadas	Telhas remexidas	Telhas trincadas	Telhas de asbesto arrancadas
A	X			X					
В	<u> </u>			X					
Cb		X	<u>x</u>	X	X				
Ca						X	X		
D								X	X

#### 4.2.2 Aplicação do Método:

Uma vez que muitas edificações foram danificadas existindo um número razoável de casos para análise, foi possível redistribuir os danos mencionados em duas subclasses: Uma subclasse incluindo o dano mais severo dentro de uma categoria de danos e a outra considerando o caso de dano mais leve possível dentro de uma categoria de danos. Esta sugestão é descrita na Tabela 4.2:

Categoría de Danos	Paredes Demolidas	Demolição Parcial	Paredes trincadas	Colapso do telhado	Colapso parcial do Telhado	Telhas arrancadas	Telhas remexidas	Telhas trincadas	Telhas de asbesto arrancadas
A (severa)	X(100%)		1	X					1
A (leve)	X (75%)			X					
B (severa)	X (50%)			X					
B (leve)	X (25%)		[	X					
Cb (severa)		X		X	<b>-</b>			<b> </b>	
Cb (leve)			X	<u> </u>	X				
Ca (severa)		<u>                                     </u>				X			
Ca (leve)			···				X		
D (severa)								X	
D (leve)									x

Tabela 4.2: Classes de danos e Sub-classes Mendonça-Filho et alli (2002)

As Figuras a seguir, todas referentes ao acidente que vitimou a FPV em 1964, Mendonça-Filho et alli (2002), ilustram cada categoria de dano, em suas subclasses de danos severos e leves, conforme os critérios adotados acima. Além disso, as fotos permitem que se tenha uma noção da destruição ocorrida em 1964. Infelizmente por mais que se deseje eliminar o subjetivismo no julgamento da classificação dos danos nas fotos, a avaliação final dependeu do observador e de sua experiência em situações semelhantes. Além da avaliação de paredes e telhados supôs-se a destruição de elementos da construção tais como: Piso e estrutura da laje, estrutura do telhado e telhas, estrutura das paredes internas e externas, reboco interno, reboco externo, portas, janelas, alicerces e porão e a outros itens tais como acabamento e pintura. Tal avaliação encontra amparo nas descrições contidas nos laudos elaborados por engenheiros referentes aos gastos para reparos das construções, (Mendonça-Filho et alli, 2002).



Figura 4.1: Vista do Epicentro (Mendonça-Filho et alli, 2002)

UN	MCAMP.	
Paint	11 211	
Dee		
E/SSUIVA-	-	



Figura 4.2: Outra vista do Epicentro, (Mendonça-Filho et alli , 2002)

## Categoria de danos B

"Casas bastante danificadas que estão além de reparos necessitando serem demolidas quando houver oportunidade. A propriedade é incluída nesta categoria se 50-75% das paredes externas for destruída, ou em caso menos severo de destruição, as paredes remanescentes apresentarão rachaduras condenando-as." Exemplos: Figuras 4.3 e 4.4, estimativas nas Tabelas 4.3 e 4.4.



Figura 4.3: Categoria B, 80 metros do epicentro (Mendonça-Filho et alli, 2002)

Distância	80 metros
Categoria de danos	B
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	100 %
Estrutura do telhado e telhas	100 %
Estrutura das paredes internas e externas	100 %
Reboco interno	100 %
Reboco externo	100 %
portas	100 %
janelas	100 %
alicerce e porão	0 %
outros: acabamento	100 %

Tabela 4.3 Estimativa para	a destruição a	80 m do e	picentro
----------------------------	----------------	-----------	----------



Figura 4.4: Categoria B, 110 metros do Epicentro.

Tabela 4.4 Estimativa para destruição a 110 m do epicentro, (Mendonça-Filho et alli, 2002)

Distância	110 metros
Categoria de danos	В
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	100 %
Estrutura do telhado e telhas	100 %
Estrutura das paredes internas e externas	75%
Reboco interno	75 %
Reboco externo	75 %
portas	100 %
janelas	100 %
alicerce e porão	0 %
outros: acabamento	100 %

## Categoria de danos Cb

"Casas que permanecem inabitáveis pelos danos causados, necessitando de bastante reparo só possível no pós guerra. Exemplo de danos incluem total colapso do telhado, demolição parcial ou total de parede externas até 25 % do total (Seatle, 1945)". Exemplos : Figuras 4.5 e 4.6. estimativas nas Tabelas 4.5 e 4.6.



Figura 4.5: Categoria Cb, 140 metros do Epicentro, (Mendonça-Filho et alli, 2002)

Distância	140 –170 metros
Categoria de danos	Cb alta
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	100 %
Estrutura do telhado e telhas	100 %
Estrutura das paredes internas e externas	50-25 %
Reboco interno	50-25 %
Reboco externo	50-25 %
portas	100 %
janelas	100 %
alicerce e porão	0 %
outros: acabamento	100 %

Tabela 4.5 Estimativa para destruição a 60 m do et	abela 4.5	5 Estimativa i	para	destruição	a	80 n	n do	epicentro
--	-----------	----------------	------	------------	---	------	------	-----------



Figura 4.6: Categoria Cb, 180 metros do epicentro (Mendonça-Filho et alli, 2002).

Distância	180-190 metros
Categoria de danos	Cb leve
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	50 %
Estrutura do telhado e telhas	50 %
Estrutura das paredes internas e externas	10-0 %
Reboco interno	10-0 %
Reboco externo	10-0 %
portas	100 %
janelas	100 %
alicerce e porão	0 %
outros: acabamento	100 %

## Categoria de danos Ca

"Casas que permanecem inabitáveis, mas podem ser razoavelmente reparáveis durante a guerra, o dano sofrido não compromete a integridade estrutural das paredes, as divisórias de madeira são danificadas, havendo danos nos batentes de portas e janelas, pequena parte da estrutura do telhado comprometida e telhas arrancadas mais de 25 %." Exemplos: Figuras 4.7 e 4.8 estimativas nas Tabelas 4.7 e 4.8.



Figura 4.7: Categoria Ca, 240 metros do epicentro (Mendonça-Filho et alli, 2002).

Distância	240-270 metros
Categoria de danos	Ca alta
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	10 %
Estrutura do telhado e telhas	25-10 %
Estrutura das paredes internas e externas	0 %
Reboco interno	0 %
Reboco externo	0 %
portas	50-25 %
janelas	50-25 %
alicerce e porão	0 %
outros: acabamento	100 %

Tabela 4.7 Estima	ativa para	destruição	a 240-270	m do epicentro
-------------------	------------	------------	-----------	----------------



Figura 4.8: Categoria Ca, 340 metros do epicentro, (Mendonça-Filho et alli, 2002).

Distância	340-370 metros
Categoria de danos	Ca leve
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	0 %
Estrutura do telhado e telhas	10 %
Estrutura das paredes internas e externas	0 %
Reboco interno	0 %
Reboco externo	0 %
portas	10 %
janelas	10 %
alicerce e porão	0 %
outros: acabamento	5 %

### Categoria de danos D

"Casas requerendo reparos, mas permanecendo habitáveis. Residências nesta categoria apresentam pequenos danos nos telhados, nas telhas, e menor efeito de fragmento nas paredes com quebra de vidros nas janelas sem comprometimento dos batentes. Casas cujas janelas quebradas representarem 10 % do total de janelas não estão incluídas." Exemplos: Figuras 4.9 e 4.10 estimativas nas Tabelas 4.9 e 4.10.



Figura 4.9: Categoria D, 740 metros do Epicentro (Mendonça-Filho et alli, 2002).

Distância	740 metros
Categoria de danos	D
Elementos considerados	Estimativa de destruição
Piso e Estrutura da Laje	0%
Estrutura do telhado e telhas	10 %
Estrutura das paredes internas e externas	0%
Reboco interno	0 %
Reboco externo	0 %
portas	0 %
janelas	20 %
alicerce e porão	0%
outros: acabamento	100 %

Tabela 4.7 Estimativa	para destruição a 7	740	m do epicentro
-----------------------	---------------------	-----	----------------

#### 4.2.3 Resultados e Discussão

Com base na classificação das edificações e das distâncias relativas ao epicentro montou-se a Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Danos Sofridos e distância ao epicentro na explosão de 1964, Mendonça-Fi	il <b>ho</b>
et alli (2002).	

Distância do Epicentro (metros)	Paredes Demolidas	Demolição Parcial	Paredes trincadas	Colapso do telhado	Colapso parcial do Telhado	Telhas arrancadas	Telhas remexidas	Telhas trincadas	Telhas de asbesto arrancadas	Categoria de Danos	severo	leve
50	Х			X	}					В		X
80	Х	I		X						В	X	
110	Х	「 <u> </u>		X			_			В		X
140		X								Ĉb	Х	
170		X		X						Cb	Х	
180			X		Х					Cb		X
190			Х		X		:			Ĉb		X
240						X				Са	X	
270						X			_	Ca	Х	
340							X			Ca		X
370							X		L	Ca		X
410								Х		D	Х	
740							[			D		

Pode-se notar que não houve enquadramento da categoria de dano A.

Os limites entre as categorias adjacentes foram estabelecidos considerando o valor médio entre o valor de dano leve de uma categoria e o valor de dano severo da categoria seguinte, tal procedimento foi adotado excetuando-se a categoria D que neste caso foi tomado como limite a distância do seu valor de dano leve.

Desta forma os limites das categorias foram: 125 m, 215 m, 390 m and 740 m para as categorias B, Cb, Ca e D, respectivamente.

A massa de carga parcial de equivalente TNT,  $Q_p$ , foi calculada considerando a razão  $\frac{D_{E_i}}{kc_j}$ , (Mendonça-Filho, 2002), onde  $D_{E_i}$  é o raio da

56
categoria e kc<sub>i</sub> é a constante da respectiva categoria. A carga parcial é tomada pelo valor médio das categorias, ou seja, para as N categorias existentes (onde N = 4, sendo, B, Cb, Ca e D) isto se torna:

$$\frac{Q_o^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{3175}{Q_o}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D_{E_i}}{kc_i} \qquad (eq.4.1)$$

Assim a massa de equivalente de TNT foi tomada como = 6.186,74 kg. A Tabela 4.9 sumariza os dados e o erros relativo ao valor médio encontrado.

Categoria de Dano	D <sub>Ei</sub> ( metros )	Q (Equivalente TNT)	$\left  rac{Q_{o}-Q_{o}}{Q_{o}}  ight $ 100
В	125	6142.83	-0,71
СЬ	215	5915.83	-4,37
Ca	390	6778.41	9,53
D	740	5942.80	-3,94

Tabela 4.9 : Massa estimada de equivalente TNT para cada categoria de dano.

### 4.2.4 Análise da Técnica Empregada

Como foi visto o método se baseia em uma avaliação subjetiva, além disso alguns outros aspectos também influenciam e não foram levados em conta, tais como a distribuição irregular das edificações, o relevo e o clima, além da dissipação da energia da onda de choque ao longo do caminho de destruição.

Os valores estimados oscilaram entre 5942,8 e 6778,4 kg, uma diferença de 835 kg com média de 6.186,74 kg. Considerando a variação de 835 kg temse, em relação a 5942,8 kg, cerca de 14,1% de erro e em relação a 6778,4 kg um erro de 12,3%. Assim o valor da carga estimada para qualquer categoria esteve dentro de uma variação em relação a média de 15%. Considerando este único caso não é possível emitir-se uma avaliação conclusiva quanto a precisão do método de utilizar as distâncias de Jarret para determinar a carga geradora de destruição. Entretanto, para este caso, os valores encontrados diferiram dentro de um intervalo de 15%.

Uma vez que havia 14.730 kg de pólvora na oficina, considerando o equivalente TNT da pólvora em 0,840 ter-se-ia então no total 12.667 kg de pólvora de modo que cerca de 6480 kg de pólvora queimaram antes de ocasionar a explosão das 6186,74 restantes.

Em 1999 ocorreu um incêndio em um paiol contendo pólvora nas dependências da Fábrica Presidente Vargas resultando numa explosão do mesmo, mostrando assim que a queima de pólvora em local confinado tende a resultar em explosão.

4.3 ESTIMATIVA DE DANOS AO PATRIMÔNIO PELO MÉTODO DE WILSON (1974)

4.3.1 Descrição da técnica

Entre 1953 e 1974, conforme Wilson (1974), foram realizadas uma série de testes envolvendo efeitos de ondas de sobrepressão de grandes cargas de explosivos e explosões nucleares. Estes testes foram patrocinados por diversas agencias americanas, e entre eles a Agencia de Defesa Nuclear –"Defense Nuclear Agency"-(DNA), a Comissão de Energia Atômica-"Atomic Energy Comission"- (AEC), o Conselho de Segurança e Explosivos –" Departament of Explosives Safety Board"- (DDESB) e a Defesa Civil –"Defense Civil Preparedness Agency" (DCPA).

Wilson e Gabrielsen realizaram um estudo revendo diversos relatórios contendo dados dos experimentos realizados. Em particular estes autores se detiveram na questão de avaliar o custo de reparação de uma edificação sujeita a uma onda de sobrepressão de longa duração.

Foram avaliados quatro tipos de edificações conforme Tabela 4.10:

58

Tipo I	Residência de dois andares construída com estrutura de madeira e porão
Tipo II	Residência de dois andares construída com tijolos e blocos de concreto com porão
Tipo III	Residência de um andar construída com estrutura de madeira estilo rancho.
Tipo IV	Residência de dois andares construída com estrutura de tijolos com paredes reforçadas

Tabela 4.10: Tipo de residências, Wilson e Gabrielsen(1974)

# O sumário dos testes realizados é apresentado na Tabela 4.11:

Teste número	Tamanho de carga*	Pico de sobrepressão kPa	Distância Metros	Distância Escalada *
		Tipo I		
I-1	16,2 kt nuclear	12,40	2286	11,75
I-2	16,2 kt nuclear	34,46	1067	5,49
I-3	30,0 kt nuclear	27,56	1676	7,02
1-4	30,0 kt nuclear	17,92	2377	9,96
I-5	5.000 kg TNT	8,96	264	15,92
I-6	5.000 kg TNT	8,27	264	15,92
I-7	500.000 kg TNT	7,58	122	15,86
1-8	100.000 kg TNT	11,03	506	11,26
1-9	500.000 kg TNT	18,61	688	8,95
		Tipo II		
(1-1	30,0 kt nuclear	11,71	3200	13,40
II-2	30,0 kt nuclear	35,14	1433	6,00
		Tipo III		•
III-1	30,0 kt nuclear	13,09	3200	13,40
<b>iii-2</b>	30,0 kt nuclear	35,14	1433	6,00
	<u> </u>	Tipo IV	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •
IV-1	50,0 kt nuclear	24,81	2140	7,56
IV-2	50,0 kt nuclear	59,26	1294	4,57

Tabela 4.11: Resumo dos resultados dos testes Wilson e Gabrielsen(1974)

\* Para explosão nuclear adotou-se o conceito de equivalência TNT igual a 0,5, ou seja 1 kt nuclear equivale a 500 ton de TNT Em inúmeros relatórios revistos durante o estudo, o dano a cada edificação foi descrito em detalhes. A freqüente dificuldade estava em mensurar o dano, por exemplo uma casa do tipo I foi sujeita a uma pressão de 8,3 kPa de uma carga de 5000 kg , sendo os danos mais evidentes na chaminé e teve um caibro do telhado quebrado, outra casa, exposta a 7,6 kPa de uma carga de 500.000 kg não experimentou danos na chaminé contudo, 19 dos 26 caibros do telhado quebraram. A questão fundamental foi qual das residências havia sofrido maiores danos?

Para mensurar os danos os autores propuseram um modelo baseado no custo de reparo da edificação. Para realizar esta avaliação elaboraram uma Tabela descritiva do custo de produção onde cada item representa um percentual do custo total da construção da edificação.

Apesar de existirem quatro tipos de residências, os autores propuseram que para todas elas, as relações de proporcionalidade segundo o custo de construção seriam conforme a Tabela 4.12:

Tabela 4.12: Proporção de custos na construção de uma residência Wilson e

	Valor
ITEM	(percentual do total)
Piso e Estrutura da Laje	17,0 %
Estrutura do telhado e telhas	7,0 %
Estrutura das paredes internas e externas	16,0%
Reboco interno	11,0 %
Reboco externo	8,6 %
portas	4,6 %
janelas	4,8%
alicerce e porão	19 %
outros: acabamento	12 %
Total	100 %

Gabrielsen(1974).

Utilizando a Tabela 4.12, avaliaram os danos sofridos a cada residência e propuseram a Tabela 4.13.

60

Teste	·······	Distância	Distância	%
número	Tamanho de carga*	m/kg <sup>1/3</sup>	Escalada	de danos
•		Tipo I	<u> </u>	• · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
j-1	16,2 kt nuclear	2286	11,75	14
I-2	16,2 kt nuclear	1067	5,49	82
1-3	30,0 kt nuclear	1676	7,02	36
1-4	30,0 kt nuclear	2377	9,96	18
I-5	5.000 kg TNT	264	15,92	5
I-6	5.000 kg TNT	264	15,92	7
I-7	500.000 kg TNT	122	15,86	6
1-8	100.000 kg ANFO	506	11,26	11
1-9	500.000 kg TNT	688	8,95	25
	•	Tipo II		
11-1	30,0 kt nuclear	3200	13,40	11
11-2	30,0 kt nuclear	1433	6,00	81
<b>_</b>	1	Fipo III		
-1	30,0 kt nuclear	3200	13,40	12
111-2	30,0 kt nuclear	1433	6,00	82
	1	Fipo IV		
IV-1	50,0 kt nuclear	2140	7,56	23
IV-2	50,0 kt nuclear	1294	4,57	53

Tabela 4.13: Valores Propostos por Wilson e Gabrielsen (1974).

Com base nesta Tabela passou-se definir como critério de segurança para habitações a distância em que os danos sofridos representem 5 % do valor total da construção, o que ocorre na distância escalada 15,9 m/kg<sup>1/3</sup>.

### 4.3.2 Desenvolvimento

A metodologia de Wilson e Gabrielsen baseia-se em fracionar o custo de construção de uma residência em uma série de itens, cada um correspondendo a um percentual do custo total da residência. O efeito da sobrepressão é avaliado então conforme os gastos para restauração dos danos causados, sendo o custo total tomado em termos de uma fração do custo total da construção da residência. Tal metodologia pode ser aplicada na análise do acidente de 1964, sendo que neste caso, como não foi possível se dispor de uma avaliação bem precisa dos estragos, os valores utilizados para descrever o percentual de danos foram estimados baseados na descrição do inquérito da época e do subjetivismo do avaliador.

Nas Figuras de 4.3 a 4.9 seguiu-se uma Tabela com avaliação do percentual de danos a cada item de construção. Tais dados estão sumarizados na Tabela 4.14, sendo que a média ponderada é o resultado da soma do produto entre o percentual de destruição e a fração de custo da construção.

Distancia ao epicentro (metros)		80	110	140	170	180	190	240	270	340
Distância escalada (m/kg1/3)		4,18	5,75	7,32	8,89	9,41	9,93	12,55	14,11	17,77
Fração do custo de ITEM construção		Percentual de destruição								
Piso e Estrutura da Laje	17	100	100	100	100	50	50	10	10	0
Estrutura do telhado e telhas	7	100	100	100	100	50	50	25	10	10
Estrutura das paredes										
internas e externas	16	100	75	50	25	10	0	0	0	0
Reboco interno	11	100	75	50	25	10	0	0	0	0
Reboco externo	8,6	100	75	50	25	10	0	0	0	0
portas	4,6	100	100	100	100	100	50	50	25	10
janelas	4,8	100	100	100	100	100	100	50	25	10
alicerce e porão	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
outros: acabamento	12	100	100	75	75	50	25	25	10	5
Média ponderada	100	81	72,1	60,2	51,3	31,0	22,1	11,15	5,95	2,24

Tabela 4.14: Aplicação da metodologia de Wilson e Gabrielsen

Os dados desta Tabela 4.14 podem ser resumidos da seguinte maneira na Tabela 4.15.

Distância escalada (m/kg <sup>1/3</sup> )	Fração do custo de construção destruído%
4,18	81,00
5,75	72,10
7,32	60,20
8,89	51,30
9,41	30,96
9,93	22,10
12,55	11,15
14,11	5,95
17,77	2,24

 Tabela 4.15: Relação entre fração do custo total da residência comprometido com a distância escalada.

Os dados anteriores podem ser ajustados para uma equação Probit, esta função de probabilidade esta associado função cumulativa de probabilidade normal, sendo definda por :

$$\operatorname{Prob} = \int_{-\infty}^{y_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Y^2}{2}\right) dz$$
(4.2.*a*)

onde:

$$Y = B + A\ln(Z) \tag{4.2.b}$$

Onde Y é o valor probit, B e A são constantes e Z é a distância escalada dada em (m/kg<sup>1/3</sup>)

O valor de Y esta relacionado com os valores de probabilidade através da Tabela probit apresentada na Tabela 4.16 Nesta Tabela o eixo das ordenadas representam a casa das dezenas enquanto que o eixo das abscissas a casa das unidades, por exemplo, para 44% o valor probit refere-se a posição (4,40), valendo 4,85:

Tabela 4.16: Relação Probit

\_\_\_\_\_

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,9	3, <b>9</b> 2	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,5	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,8	4,82	4,85	4,87	4,9	4,92	4,95	4,97
50	5	5,03	5,05	5,08	5,1	5,13	5,15	5,18	5,2	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,5
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5, <del>9</del> 9	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

A partir dos valores probit podemos realizar um ajuste de valores, de modo que os valores probit obtidos no ajuste podem ser novamente relacionados com os valores de probabilidade através da seguinte equação:

$$P_{rob} = \frac{112}{\pi} \left( \operatorname{atan} \left( 1,55 \operatorname{sinal} (Y-5) \operatorname{abs} (Y-5)^{1,32} \right) + \frac{\pi}{2} \right) - 6$$
(4.4)

Procedendo deste modo obtemos para o caso do acidente de 1964 a seguinte equação:

$$Y = 9,3209417 - 2,168176\ln(Z) \tag{4.5}$$

Cujo gráfico de ajuste é apresentado na Figura 4.10:

.



Figura 4.10 Ajuste dos dados de 1964 por equação tipo probit

O ajuste a partir dos dados de Wilson (1974) forneceu a seguinte função:

$$Y = 8,8697259 - 2,008795\ln(Z) \tag{4.6}$$

A função proveniente dos dados de Wilson (1974) apresentou gráfico de ajuste dado pela Figura 4.11.



Figura 4.11: Ajuste dos dados fornecidos Por Wilson e Gabrielsen

# 4.3.3 Resultados do Emprego da Técnica de Wilson (1974)

	Percentual de danos estimado		
Distância escalada M/kg <sup>1/3</sup>	Ajuste de dados de 1964	Ajuste dos dados de Wilson e Gabrielsen	Erro relativo com base no ajuste de dados de Wilson e Gabrielsen
4	90,9	87,3	4,20%
5	81,4	75,2	8,30%
_6	_67,0	59,6	12,50%
7	52,7	49,2	7,06%
8	44,0	38,7	13,54%
9	32,6	28,4	15,08%
10	23,6	20,8	13,37%
11	17,3	15,6	10,86%
<u>1</u> 2	13,1	12,0	8,50%
13	10,1	9,5	6,45%
14	8,0	7,6	4,66%
15	6,4	6,2	3,04%
16	5,1	5,0	1,49%
17	4,1	4,1	-0,06%
<u>1</u> 8	3,3	3,4	-1,70%

Comparando os valores das equações de ajuste montou-se a Tabela 4.17.

Tabela 4.17 Comparação de resultados

Na Tabela 4.17, o erro relativo se manteve inferior a 15%. Para distância escalada Z= 16 m/kg<sup>1/3</sup> o percentual de danos patrimonial foi estimado em 5%, tal valor é o mesmo que Wilson e Gabrielsen encontraram em seu ajuste para Z= 15,8 m/kg<sup>1/3</sup>.

Pode-se supor inicialmente que os dados de Wilson e Gabrielsen se diferem dos dados obtidos do acidente de 1964 devido a fatores como o tipo de construção. Wilson e Gabrielsen estudaram residências de dois andares de madeira com porão enquanto no acidente de 1964 as edificações eram estruturas de tijolos de um andar. Dada a maior fragilidade da construção de madeira seria esperado para uma mesma distância escalada os valores de destruição fossem maiores para a construção de madeira.

Com base neste pressuposto foi revisto o critério de ajuste de equivalência TNT para as cargas adotadas por Wilson e Gabrielsen e sobre isto existem as seguintes críticas: i-) Adotou-se o equivalente TNT em 0,5. Contudo, conforme Reed, (1998) na análise do acidente da PEPCON, e também Kinney e Graham (1985) na obra intitulada "Explosives Shock in Air", o equivalente energético TNT para uma explosão atômica é 0,5. Além disso, uma carga explodindo no ar, longe de uma superfície rígida, possui uma atenuação no seu equivalente devendo ser multiplicada por  $\frac{1}{1.8}$ , assim o equivalente TNT para as cargas nucleares deveria

ser adotado como  $\frac{0.5}{1.8} = 0.2778$ .

ii-) O equivalente do ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil) é 0,86 e não foi usado para corrigir a carga de 100,000 kg de ANFO.

Utilizando estes dois fatores de correção nos dados apresentados por Wilson e Gabrielsen teremos a alteração de alguns valores, conforme apresentados na Tabela 4.18.

f			D: (2 (	0/		
Taska		Diatênain	Distancia	% 		
reste	Avallação de carga	Distancia	Escalada	de danos		
número	Em kg de TNT					
		Tipo I				
I-1	9.000.000	2286	14,30	14		
I-2	9.000.000	1067	6,67	82		
1-3	16.666.667	1676	8,54	36		
<u> -4</u>	16.666.667	2377	12,11	18		
1-5	5.000	264	15,92	5		
I-6	5.000	264	15,92	7		
I-7	500.000	122	15,86	6		
I-8	86.000	506	11,84	11		
I-9	500.000	688	8,95	25		
		Tipo II				
-1	16.666.667	3200	16,30	11		
II-2	16.666.667	1433	7,30	81		
		Tipo III				
-1	16.666.667	3200	16,30	12		
-2	16.666.667	1433	7,30	82		
	Tipo IV					
1V-1	27.777.778	2140	9,19	23		
IV-2	27.777.778	1294	5,56	53		
IV-2	27.777.778	1294	5,56	53		

Tabela 4.18 Dados Revisados

Com estes dados a equação de ajuste para o tipo I se torna:

$$Y = 9,8792743 - 2,3432027\ln(Z) \tag{4.7}$$





Figura 4.11: Ajuste dos valores de Wilson e Gabrielsen revisados

A superposição dos gráficos oriundos da planilha de Wilson e Gabrielsen, do ajuste baseado na explosão de 1964 e na revisão dos dados de Wilson e Gabrielsen apresenta o seguinte aspecto mostrado na Figura 4.12.



Figura 4.12: Sobreposição dos modelos ajustados

Na Figura 4.12 observa-se que o efeito da correção de valores nos dados de Wilson e Gabrielsen resultou em uma curva probabilística situada após a curva de ajuste dos dados de 1964, em oposição à curva original. Isto sugere que as e residências de madeira de dois andares apresentam maior destruição do que as residências de um andar de tijolos. Sabemos que residências de madeira possuem maior flexibilidade que as de alvenaria, contudo as edificações de dois andares apresentam maior área exposta a onda de sobrepressão e, portanto estão mais sujeitas a esforço.

Distância escalada (m/kg <sup>1/3</sup> )	Wilson e Gabrielsen Ajuste dos dados Originais	Ajuste pelos dados de 1964	Wilson e Gabrielsen Ajuste dos dados Corrigidos
4	90,9	87,3	94,0
5	81,4	75,2	87,1
6	67,0	59,6	75,7
7	52,7	49,2	60,6
8	44,0	38,7	49,8
9	32,6	28,4	39,6
10	23,6	20,8	28,8
11	17,3	15,6	20,8
12	13,1	12,0	15,4
13	10,1	9,5	11,7
14	8,0	7,6	9,1
15	6,4	6,2	7,2
16	5,1	5,0	5,7
17	4,1	4,1	4,6
18	3,3	3,4	3,6

Tabela 4.19 comparativa dos valores obtidos pelos diferentes ajustes

Uma análise da Tabela 4.19 mostra que o ajuste dos dados corrigidos somente alterou os valores para danos com maior intensidade. Para valores menores de danos as três equações se assemelham de modo que para a distância de segurança de 15,8 m/kg<sup>1/3</sup> foi mantida a expectativa de 5% de danos, como esperado.

Comparando a equação de ajuste dos dados de 1964 com todos os dados fornecidos por Wilson (1974) temos a Figura 4.13.



Figura 4.13 : Comparação de dados com o ajuste de 1964

72

# Capítulo 5

# Avaliação de Risco Utilizando Correlações Estatísticas

5.1 INTRODUÇÃO

Como foi possível observar no capítulo anterior, os critérios de distância de segurança se basearam em estudos de análise de danos estruturais às edificações.

A questão fundamental para se estabelecer uma distância de segurança se restringiu até agora, ou ao custo de reparos ou a uma baixa probabilidade de óbitos.

Considerando-se que na atualidade tem sido dada muita atenção à valorização da vida humana ocorre que no âmbito legislativo a responsabilidade do empregador aumentou muito desde a década de 60 de modo que neste período a sociedade tornou-se mais exigente no estabelecimento de normas de segurança. Para citar como exemplo, a Noruega aprovou recentemente uma legislação em que o critério individual de risco para as atividades industriais foi alterado de 10<sup>-5</sup>/ano para 10<sup>-6</sup>/ano (Sigbjorn, 2002).

Portanto um estudo mais aprofundado considerando os aspectos relativos à probabilidade de ferimentos em casos envolvendo outros tipos de construções como escolas, asilos, hospitais entre outros pode fornecer uma base para melhor desenvolver-se um critério de distância de segurança.

#### 5.2 DESENVOLVIMENTO

### 5.2.1 Fatores Relevados no Estabelecimento das Distâncias de Segurança

O acidente de 1964 ocorreu às 4:20 hs, em um período em que a Fábrica Presidente Vargas se encontrava praticamente vazia de modo que o número de vítimas foi pequeno restringindo-se a aqueles que estavam dentro da oficina conforme o Inquérito da época.

A explosão resultou num amplo espectro de destruição patrimonial já tratado anteriormente.

Contudo uma revisão da literatura permite gerar uma avaliação ainda que limitada do que poderia ter acontecido se o acidente ocorresse em horário mais movimentado.

Primeiramente, pode-se classificar didaticamente os danos gerados em pessoas por uma explosão em cinco grupos principais:

1 - Primários: Danos primários da onda de sobrepressão são produzidos pelo efeito direto da onda de sobrepressão no corpo humano. Essa onda dada sua elevada aceleração induz grande esforço na superfície do corpo afetando os locais onde existem internamente gases, ou seja, pulmões e ouvidos. No caso dos pulmões a intensidade da compressão da parede torácica pode resultar em hemorragia por ruptura dos brônquios chegando a causar a morte da vítima. Neste caso dada a inércia do movimento, o resultado é dependente tanto da magnitude da pressão incidente quanto do tempo de aplicação da mesma, ou seja, da duração da ação da onda de sobrepressão, de forma que se consideram que os danos pulmonares são dependentes tanto da pressão incidente como da impulsão transferida ao tórax. Já no caso dos ouvidos, como as paredes dos tímpanos são tão delgadas que o tempo de duração da pressão necessário para ruptura das mesmas é muito curto em relação à duração normal das ondas de sobrepressão, considera-se a ruptura dos tímpanos como dependente somente da pressão.

2 - Secundários: São danos produzidos pelos impactos de fragmentos lançados pela explosão sobre o corpo humano. Os fragmentos podem ser originários tanto da embalagem do explosivo como originário de pedaços da construção onde estava o material explosivo. Neste caso, os fragmentos podem

74

atingir o corpo causando penetração ou simplesmente transferindo impacto sem penetração. De qualquer modo, podem ocorrer lacerações, ruptura de tecido é fraturas.

3 - Terciários: Decorrem do deslocamento do corpo causado pela onda de sobrepressão e deslocamento dos gases gerados. Neste caso, o corpo humano é "soprado", ganhando quantidade de movimento e atingindo superfícies rígidas, causando com isso em geral escoriações e fraturas.

4 - Queimaduras: As chamas produzidas em um evento explosivo são de muito curta duração, mas de elevada temperatura, de forma que ocasionalmente as partes do corpo atingidas pela "bola de fogo" podem resultar em queimaduras e, dependendo da magnitude da carga envolvida e das condições ambientais de umidade, a radíação térmica pode causar incêndio em roupas, ou, em materiais combustíveis adjacentes.

5 - Psicológicos: Os efeitos psicológicos estão associados à geração de pânico. Por exemplo, a quebra de vidros em locais distantes de uma explosão, associada ao forte barulho, pode criar condições de histeria em um ambiente relativamente lotado onde a multidão em pânico tentará deixar o local de forma desorganizada o que pode causar vítimas e até mesmo morte por pisoteamento.

Os efeitos são dependentes de condições bastante variadas do ambiente como: materiais de construção, condições meteorológicas, fatores fisiológicos das vítimas entre outros.

Sobre fatores fisiológicos os mais importantes talvez sejam os fatores préexistentes e a idade. Não é correto admitir que idosos, bebes e crianças tenham a mesma resistência que indivíduos na faixa etária de 18 a 30 anos.

De um modo geral as equações utilizadas para estimativa de dano não fazem distinção quanto à faixa etária e às condições pré-existentes dos indivíduos.

Basicamente, pode-se considerar que a população que esteja nas imediações de um acidente explosivo esteja exposta à seguinte gradação de evento:

 População próxima ao acidente: Sujeitos a intensa fragmentação da alvenaria do epicentro, radiação térmica, ondas de sobrepressão, cujo resultado esperado é o óbito.  População nas imediações, mas não tão próximas do epicentro: Menor intensidade dos efeitos de pressão, provável estilhaçamento de janelas causando cortes e menor exposição aos fragmentos originados da alvenaria do epicentro, cujo resultado esperado são ferimentos, mas não a morte.

-Populações distantes do epicentro: reduzida intensidade da onda de sobrepressão causando a quebra de vidraças, rachadura no forro de gesso e grande barulho. Provável causa de lesão se dá pelo susto decorrente do elevado nível de ruído da explosão com possibilidade de perda de direção e batidas, pânico em locais de grande concentração como shoppings e escolas, com possibilidade de lesão devido ao empurra-empurra, pisoteamento nos casos mais severos e, nos casos de asilos onde a faixa etária é mais elevada, o susto pode ocasionar lesões e até falecimento aos que forem mais pré-dispostos a doenças cardíacas.

# 5.2.2 Uso de Correlações Para Estimativa de Lesões e Falecimento

Um estudo comparativo de correlações de danos a seres humanos pode auxiliar a definir as áreas onde os aspectos de falecimento, lesões severas e leves e efeitos psicológicos serão mais pronunciados. Para isso, foram revistos os dados e modelos matemáticos para os seguintes casos:

- a) Efeito de sobrepressão e impulsão sobre o corpo humano causando ruptura pulmonar.
- b) Efeito de sobrepressão sobre os ouvidos causando ruptura de tímpano.
- c) Desmoronamento de residências causando óbito.
- d) Efeito de sobrepressão e impulso em residências causando ferimentos.
- e) Efeitos de quebra de vidros.
- f) Efeitos psicológicos.
- g) Efeitos de Ruído.

O estabelecimento de distâncias de segurança está intimamente ligado à definição de critério de danos, com o objetivo de limitar as conseqüências de um evento explosivo de modo e reduzir a extensão de danos. Desta forma, as

conseqüências de um acidente explosivo ficam limitadas ao conceito de "darios aceitáveis".

Enquanto a legislação dos Estados Unidos da América fixou o critério para distância de segurança de edificações habitadas em termos de 5 % de danos no valor patrimonial do imóvel, a legislação Inglesa se baseou no critério de reduzir a quantidade de vítimas humanas.

D. J. Hewkin relata em trabalho publicado em 1992, que a ESTC (órgão interno do departamento de defesa Inglês) após uma longa revisão de casos de acidentes em larga escala e estabeleceu as seguintes equações para correlacionar a probabilidade de falecimento devido a ação da sobrepressão com a distância escalada:

No caso de falecimento fora de edificações, (Moreton, 2000):

$$P_{\text{prob}} = \frac{e^{(-5,78531 \ Z+19,04676)}}{100}$$
(5.1)

Para o caso de falecimento no interior de edificações, (Moreton, 2000):

$$\log_{10} (P_{\text{prob}}) = 1,82660648 - 3,43347169 \log_{10}(Z) - 0,85304626 (\log_{10}Z)^{2} + 0,355805719 (\log_{10}(Z))^{3}$$
(5.2)

onde P obito é o termo referente à probabilidade de óbito.

Este ajuste estatístico se baseou em dados empíricos de uma população distribuída aleatoriamente no terreno, de modo, que alguns fatores comumente associados a óbito não foram considerados. Assim, para o caso de posicionamento fora de residências deixou-se de se considerar a posição do corpo, como em pé, sentado, próximo ou distante de superfícies rígidas.

O efeito da posição é fundamental para um estudo de situação caso a caso. Contudo para uma população distribuída aleatoriamente faz-se uso da correlação desenvolvida pelo ESTC.

O mesmo pode ser dito para a equação de ajuste probabilística para pessoas no interior de residências, neste caso não há informações sobre o

material utilizado nas residências nem se a construção possuía andares, porão etc.

# 5.2.3 Resultados e Discussão

Para cada tipo de posição e situação, conforme apresentado na figura 5.1, existe uma relação envolvendo pressão incidente e impulso para estabelecer a probabilidade de óbito, Absil (1998).



Figura 5.1: Orientações possíveis no momento da chegada da onda de sobrepressão sobre o indivíduo.

Cabe ressaltar que para o caso de óbito fora de residência, para distância escalada menores que 2,5m/kg<sup>1/3</sup> a equação 5.1 estima em cerca de 100% a probabilidade de falecimento e para 3,25m/kg<sup>1/3</sup> a probabilidade é estimada em cerca de1%, pela mesma equação.

No caso de pessoa dentro de residências a equação 5.2 estima em cerca de 100% ocorre para valores inferiores a 3,0m/kg<sup>1/3</sup> e o valor de 1% ocorre próximo a distância escalada 10m/kg<sup>1/3</sup>.

O gráfico apresentado na figura 5.2, ilustra o comportamento da curva de estimativa de probabilidade utilizando as equações 5.1 e 5.2 para pessoas situadas entre as distâncias escaladas 2,0 m/kg<sup>1/3</sup> e 10,0m/kg<sup>1/3</sup>.



Figura 5.2: Probabilidade de óbito para o caso de indivíduos situados dentro e fora de casa .

O comportamento dos gráficos sugere que alguém que não esteja em uma residência terá probabilidade de morte menor que 1%, a uma distância escalada de 3,25 m/kg<sup>1/3</sup>, enquanto se estivesse dentro da residência estaria sujeito a 1% de óbito a uma distância escalada de 10 m/kg<sup>1/3</sup>.

Ocorre que indivíduos fora de residência estão mais expostos ao impacto de fragmentos da explosão do que aqueles que estiverem abrigados. O aspecto de arremesso de fragmentos não foi considerado na equação probabilística, e portanto, as equações utilizadas somente se baseiam em efeitos da sobrepressão.

O tipo de lesão não letal mais comumente encontrado em indivíduos sujeitos diretamente a sobrepressão é o ruptura de tímpanos.

Neste caso, diferentemente da ruptura pulmonar, que está sujeita, tanto à pressão como à impulsão, a ruptura de tímpanos está sujeita somente à pressão incidente, como proposto anteriormente. Existem disponíveis na literatura duas bases de dados considerados para estimativa de ruptura de tímpanos. A primeira base é adotada pelo DoD 6055-9 e a segunda ajustada por Eisenberg, permanece em estudo pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e pela OTAN (Absil, 1998).

A tabela 5.1 abaixo apresenta alguns dados para as correlações anteriormente discutidas Absil (1998).

Probabilidade de Ruptura de Tímpano	Distância escalada Prevista no DoD 6055-9 m/kg <sup>1/3</sup>	Distância Escalada segundo Eisenberg m/kg <sup>1/3</sup>
1%	7,87	9,28
10 %	4,84	8,30
50 %	3,16	4,98
90%		3,50
99 %	1,55	

Ajustando os dados acima para equações do tipo Probit encontrou-se as seguintes relações;

Ajuste dos dados constantes no DoD 6055-9:

 $Y = 8,3942689 - 2,8565893 \ln(Z)$  (5.3)

Ajuste nos dados de Eisenberg:

 $Y = 10,514668 - 3,3862291 \ln(Z)$ (5.4)

O gráfico da figura 5.3, ilustra o comportamento da curva probabilística para ruptura de tímpano com a distância escalada. Como pode-se observar o ajuste dos dados de Eisenberg apresenta um espectro de abrangência muito maior que o apresentado pelo DoD 6055-9.



Figura 5.3: Probabilidade de perda Auditiva pela distância escalada

De certa forma podemos esperar que haja ruptura de tímpano com probabilidade de 1 % a uma distância escalada variando de 7,87 m/kg<sup>1/3</sup> e 9,28 m/kg<sup>1/3</sup>.

A ruptura de tímpano causa incapacitação e desorientação do indivíduo. Quem estiver dirigindo está sujeito a colisões e atropelamentos, quem estiver subindo ou em posições elevadas está sujeito a quedas, de modo que a desorientação oriunda do ruptura de tímpano pode causar acidentes indiretos. Vale lembrar que em explosões submarinas a ruptura do tímpano pode ser extremamente grave pela desorientação causada a vítima.

A uma distância superior a 9,28 m/kg<sup>1/3</sup>, embora a probabilidade de ruptura do tímpano seja inferior a 1% existe ainda o efeito da perda temporária de audição que incapacita temporariamente, resultando em desorientação. A tabela 5.2 apresenta os limites em termos de distância escalada para ruptura de tímpano e perda temporária de audição.

Ruído e Probabilidade de danos auditivos	Ruído (dB)	Z m/kg <sup>1/3</sup>
Limite de probabilidade de Ruptura de tímpano	185	9,52
Limite de perda temporária de audição	160	130

# Tabela 5.2: Limites de Ruptura de tímpano e perda temporária de Audição

Deste modo para um transeunte a distância escalada não deve ser menor que 9,52 m/kg<sup>1/3</sup> tendo como base o critério de ruptura de tímpano e suas conseqüências de incapacitação e desorientação.

Pedestres ao redor de rodovias são potencial de risco significativo, pois a desorientação pode levar a atropelamentos.

No caso de motoristas, os carros com vidro fechado certamente causariam um efeito abafador no ruído protegendo o motorista de ruptura de tímpano, contudo, dado a intensidade de ruído (185 dB) é provável que ocorra perda temporária de audição seguidas de desorientação.

Se a janela fechada do veiculo atuasse como um abafador similarmente a um equipamento de proteção individual tipo concha, cuja atenuação é de 18 a 20 dB então o ruído que o motorista estará sujeito será de 165 a 167 dB que ainda assim está acima do valor limite de surdez temporária. Considerando que a eficiência da janela é menor que do abafador tipo concha mas que reduza o ruído em 15 dB e com base na equação para nível de ruído proposta por Ezparza (2000) para cargas explosivas:

$$SPL = 216,134 - 13,37 \ln\left(\frac{R}{Q^{1/3}}\right)$$
(5.5)

Onde SPL é o nível de ruído em dB

Então pode-se montar a tabela 5.3 para distâncias escaladas compreendidas entre 10 m/kg<sup>1/3</sup> a 40 m/kg<sup>1/3</sup>.

Distância Escalada	Ruído (dB)	Ruído atenuado
m/kg <sup>1/3</sup>	Equação	Em 15 dB
	SPL	
10,0	185,3	170,3
12,5	182,3	167,3
15,0	179,9	164,9
17,5	177,8	162,8
20,0	176,0	161,0
22,5	174,5	159,5
25,0	173,1	158,1
27,5	171,8	156,8
30,0	170,6	155,6
32,5	169,6	154,5
35,0	168,6	153,6
37,5	167,6	152,6
40,0	166,8	151,8

Tabela 5.3: Ruído com a distância escalada e efeito de Abafamento utilizando a equação de

Esparza (2000).

Deste modo para motoristas de veículos com janelas fechadas a uma distância escalada maior que 22,5 m/kg<sup>1/3</sup> a probabilidade de surdez temporária é baixa. Com isto, se reduz a possibilidade de perda de direção e de acidentes decorrentes.

Para o caso de indivíduos localizados dentro de residências a expectativa de óbito não é esperada acima da distância escalada de 10 m/kg<sup>1/3</sup>.

Para o caso de feridos o ESTC não apresenta nenhum tipo de correlação. Os dados utilizados pelo Ministério da Defesa inglês para o critério de distância de segurança derivam da análise feita durante a segunda guerra mundial por Jarret, (Smith, 1995), envolvendo o conceito de categoria de danos.

Para cada categoria de danos pode-se resumir o potencial de risco conforme a Tabela 5.4.

84

Categoria	Risco Potencial Associado
de Danos	
A	Os residentes estão sujeitos ao impacto dos pedaços de alvenaria durante o desmoronamento da edificação, que podem causar fraturas e ferimentos. As janelas se estilhaçam lançando fragmentos com alta velocidade capazes de penetrar no corpo humano causando hemorragia e laceração. Após o desmoronamento aqueles que foram soterrados pelos escombros estão sujeitos a asfíxia tanto pela poeira gerada como pela ação do peso dos escombros sobre o tórax.
В	Os residentes estão sujeitos ao impacto dos pedaços de alvenaria durante o desmoronamento da edificação com menor intensidade que no caso acima, pois entre 25% e 50% da estrutura não desmoronam. Ainda assim existe o risco mas (com menor intensidade) de fraturas e ferimentos. As janelas se estilhaçam lançando fragmentos com alta velocidade capazes de penetrar no corpo humano causando hemorragia e laceração. Após o desmoronamento aqueles que foram soterrados pelos escombros estão sujeitos a asfixia tanto pela poeira gerada como pela ação do peso dos escombros sobre o peito.
Cb	Os residentes estão sujeitos principalmente ao impacto dos pedaços oríundos do colapso do telhado, uma vez que a probabilidade de desmoronamento das paredes é remota.Com baixa probabilidade de desabamento não se esperam vítimas por soterramento. As janelas são um grande potencial de risco pois estas se estilhaçam produzindo fragmentos com potencial de penetração ( > 1 cm) e laceração.
Ca	Os residentes estão menos sujeitos ao impacto dos pedaços oriundos do colapso do telhado, uma vez que a estrutura do mesmo possui baixa probabilidade de colapso, como as paredes se mantêm inexiste a possibilidade de soterramento. As janelas são o potencial de risco pois estas se estilhaçam produzindo fragmentos com maior probabilidade de laceração da pele e de reduzida penetração ( < 1 cm).
D	Os residentes não estão sujeitos ao impacto dos pedaços oriundos do colapso do telhado nem de soterramento. As janelas são o potencial de risco pois estas se estilhaçam produzindo fragmentos com probabilidade de laceração da pele e reduzida possibilidade de penetração.

Tabela 5.4: Risco Potencial Associado a Categoria de Danos, conforme Smith (1995)

Os dados coletados durante a segunda guerra foram resumidos na tabela 5.5 em relação a cada categoria de danos.

<u> </u>		Vítimas		
Categoria de danos	Numero de vítimas	Mortos por ferimentos %	Feridos seriamente %	Feridos levemente %
A	323	23,5	19,1	6,2
B	257	2,7	11,3	8,6
Cb	326	0	9,2	5,8
Са	182	0	2,2	2,2
D	45	0	0	0

Tabela 5.5: Estatística de feridos e óbitos baseados no critério de categoria de danos Galbraith (1998)

É fundamental observar que dentro da categoría de danos Cb, que se inicia em 7,1 m/kg<sup>1/3</sup> e termina em 12,4 m/kg<sup>1/3</sup>, não foram observados óbitos, embora o ESTC tenha admitido por critério para 10 m/kg<sup>1/3</sup> que a probabilidade de tal ocorrência seja de 1%, Hewkin (1992)

O total de feridos para a categoria Ca, que se inicia em 12,4 m/kg<sup>1/3</sup> e termina em 21,3 m/kg<sup>1/3</sup>, é de cerca de 4,4 %, não sendo observado feridos para fora de 21,3.

Deste modo, foi estabelecido pelo Ministério da defesa Inglês a distância de segurança para edificações em 22 m/kg<sup>1/3</sup>, (Hewkin, 1992).

Com o objetivo de entender os fatores associados a geração de feridos e para verificar a tendência probabilistica de feridos com a distância escalada propôs-se a montagem da tabela 5.6. Esta nova tabela foi reescrita considerando o total de feridos, ou seja, englobando em uma única coluna os valores de todas as casualidades (Galbraith, 1992).

		[			
Categoria de danos	Numero de ocupantes	Mortos por ferimentos %	Feridos seriamente %	Feridos levemente %	Total de Feridos %
A	323	23,5	19,1	6,2	48,8
В	257	2,7	11,3	8,6	22,6
Cb	326	0	9,2	5,8	15,0
Ca	182	0	2,2	2,2	4,4
D	45	0	0	0	0

Tabela 5.6: Relação de total de feridos e casualidades com a distância escalada

Desta forma, tem-se o valor de total de feridos englobando os diversos graus de severidade como morte, feridos seriamente (que necessitaram de internação e hospitalização) e os feridos leves (que não necessitaram de internação).

Uma vez que a curva de letalidade é dada pela equação desenvolvida pelo ESTC, propõe-se para estimar o total de feridos montar-se uma nova tabela, tabela 5.7, onde relaciona-se o valor estatístico para o total de feridos de cada categoria de danos com a distância escalada típica para o limite de cada categoria.

Valores percentuais de Feridos	Valores Probit	Distância Escalada SD m/kg <sup>1/3</sup>	Valores Percentuais estimados
48,8	4,97	4,80	46,01
22,6	4,245	7,20	27,64
15,0	3,96	12,40	11,86
4,4	3,294	21,30	5,05

Tabela 5.7: Valores percentuais de feridos, o valor Probit referente ao percentual e a

distância escalada

O ajuste destes dados nos forneceu a seguinte relação Probit.

 $Y = 6,5083009 - 1,04881 \ln(Z)$ 

(5.6)

O gráfico da figura 5.4 apresenta a relação entre a curva ajustada e os pontos originais.



Figura 5.4: Curva de ajuste e pontos da curva probabilística de ocorrência de ferimentos.

## Com base na equação 5.6 acima apresenta-se a tabela 5.8.

Distância Escalada	Probabilidade (%)	
m/kg <sup>1/3</sup>	da curva de ajuste	
3	63,5	
5	44,3	
10	16,6	
16	8,0	
19	6,1	
20	5,6	
21	5,2	
22	4,8	
25	3,8	
30	2,7	
35	1,9	
40	1,3	
44	0.92	

Tabela 5.8: Valores do Ajuste de dados para previsão de feridos

Na tabela 5.8 de ajuste de dados pode-se verificar que para a distância escalada 3 m/kg<sup>1/3</sup> a curva de óbito indica 63,5 % de óbito. Nesta distancia escalada o indivíduo está sujeito a ferimentos devido tanto a desabamento das paredes e telhados como à intensa fragmentação de

janelas. Aqueles que estiverem situados além de 10 m/kg<sup>1/3</sup>, estão menos sujeitos a se ferir com desabamento das paredes contudo ainda existe uma intensa fragmentação de vidro decorrente do estilhaçamento de janelas. Para distâncias superiores a 22 m/kg<sup>1/3</sup>, considera-se que os ferimentos estão relacionados principalmente à quebra de janelas.

Assim, os fatores geradores de ferimentos são diversos e atuam com diferentes intensidades, de modo que a curva de ajuste não relaciona a ação de um único fenômeno.

Merrifield (2000), na análise do acidente de Peterborough, envolvendo 800 kg de alto explosivo (dinamite) relatou que os ferimentos mais distantes do epicentro estavam relacionados à quebra de vidraças. A tabela 5.10 sumariza os dados apresentados por Merrifield (2000).

Descrição Qualitativa	Distância do epicentro (carga de 800 kg ) em metros	Distância escalada
Cortes em todos	50	5,39
Cortes em muitos	70-100	7,54 - 10,77
Cortes em alguns	100-150	10,77 - 16,15
Corte mais longínquo	200	21,54

Tabela 5.10: Relação entre os dados de Merrifield (2000)

A análise estatística dos casos das vítimas dos atentados de Oklahoma e com as torres Khobar é apresentada nas figuras à seguir. Na figura 5.5, apresenta-se o percentual do corpo atingido e o percentual de dano sofrido para o caso de óbitos, conforme Leão (2000).

88



Figura 5.5: Estatística de Ferimentos por Área de corpo Atingida no caso de óbitos nos Atentados de Oklahoma e Khobar Tower.

A figura 5.6 ilustra o caso de feridos e apresenta o percentual do corpo atingido e o percentual de dano sofrido.

Como pode ser observada pela tipificação dos ferimentos, a severidade dos mesmos é oriunda do desabamento das edificações, tanto no caso de óbito como no caso dos sobreviventes.



Figura 5.6: Estatística de Ferimentos por Área de corpo Atingida no caso de Sobreviventes Hospitalizados dos Atentados de Oklahoma e Khobar Tower.

Reed, relatou os danos e ferimentos observados na explosão da PEPCON em 1988, com equivalente de 1 kt de explosão nuclear. Segundo Reed (1992) os ferimentos e danos observados após a distância de segurança americana de 19 m/kg<sup>1/3</sup> podiam ser ajustados à curva de quebra de vidraças.

Deste modo, pode-se admitir que após alguma distância escalada a tendência de ferimentos estará relacionada com a quebra de janelas.

Os dados do DoD6055-9 para quebra de janelas são apresentados na tabela 5.10.

Distância	Probabilidade de quebra de janelas			
Escalada m/kg <sup>1/3</sup>	Janela 1	Janela 2	Janela 3	
15,87	85	100	100	
19,84	60	100	100	
23,8	41	100	100	
27,77	26	100	100	
31,74	16	94	100	
35,7	10	76	100	
39,67	6	55	100	
59,51	1	8	49	
130,12	0	0,1	0,8	

Tabela 5.10: Dados sobre quebra de janelas

Obs: Janela 1: comprimento de 30,5 cm, largura de 61 cm e espessura de0,223 cm. Janela 2: comprimento de 61 cm, largura de 61 cm e espessura de0,223 cm. Janela 3: comprimento de 106,7 cm, largura de 91,4 cm e espessura de 0,395cm.

Ajustando-se os dados de probabilidade de quebra de vidraças do DoD 6055-9 tem-se as seguintes equações probit:

Janeias 1:

Y = 12,88828 - 2,5452257 In(Z)

Janelas 2:

 $Y = 23,288748 - 4,062974 \ln(Z)$ (5.8)

Janelas 3:

$$Y = 20,954833 - 3,7905622 \ln(Z)$$
(5.9)

A janela 1 é considerada típica de residências, a janela 2 de grandes vidraças típicas de "shopping centers", escolas, comércio, etc. A janela 3 é um caso de extrema sensibilidade e está presente em alguns tipos de edificações. O

(5.7)

gráfico 5.7 ilustra o comportamento dos três tipos de janelas com a distância escalada.



Figura 5.7: Distância escalada e probabilidade de quebra de janelas.

Considerando a janela 1 como típica de residências e semelhante à janela utilizada nas construções pela população inglesa na época da Segunda Guerra Mundial, propõe-se relacionar a equação de ajuste de feridos elaborada com a probabilidade de quebra de janelas. Daí a tabela 5.11:
Distância escalada m/kg <sup>1/3</sup>	Probabilidade de quebra de janela (tipo 1) % a	Ajuste dos dados de feridos da 2 guerra b	$k_{a,b} = \frac{a}{b}$	Modelo $k_{a,b}x(a)$
10	97,14	16,58	0,1707	10,69
11	95,60	14,28	0,1494	10,52
12	93,76	12,48	0,1331	10,31
13	91,52	11,02	0,1204	10,07
14	88,80	9,83	0,1107	9,77
15	85,48	8,83	0,1033	9,40
16	81,45	7,99	0,0981	8,96
17	76,64	7,27	0,0948	8,43
18	71,12	6,64	0,0933	7,82
19	65,17	6,09	0,0934	7,17
20	59,29	5,60	0,0945	6,52
21	54,08	5,17	0,0956	5,95
22	50,33	4,78	0,0950	5,54

Tabela 5.11: Comparação entre número de feridos e a quebra de vidraças.

Temos em (a) a probabilidade de quebra de vidraças, em (b) a equação de ajuste de feridos e o parâmetro  $k_{a,b}$  a razão entre (a) e (b) , podemos observar que a partir da distância escalada 15 m/kg<sup>1/3</sup> o fator  $k_{a,b}$  tende a uma constante, ou seja , varia muito pouco. Isto está de acordo com o proposto por Reeds (1992).

O gráfico a seguir apresenta o comparativo do ajuste de dados da Segunda Guerra Mundial com um modelo baseado no valor estimado para quebra de vidraças multiplicado pelo fator  $k_{a,b}$ , que pode ser visualizado na figura 5.8.



Figura 5.8: Figura comparativa entre o ajuste de dados de feridos e um modelo baseado na probabilidade de quebra de vidraças.

Como podemos verificar existe uma boa correspondência entre o ajuste de dados de feridos da Segunda Guerra Mundial com o comportamento predito para quebra de janelas a partir da distância escalada 14 m/kg<sup>1/3</sup>.

A tabela 5.12 apresenta a descrição de Merrifield (1998), os valores estimados de quebra de vidraças e a estimativa de feridos conforme a equação 5.6 referente ao ajuste da segunda guerra. Fica claro que abaixo de 16 m/kg<sup>1/3</sup> a probabilidade de corte de vidro segue outro fator independente da quebra de janelas.

Descrição Qualitativa	Distância do epicentro (carga de 800 kg ) em metros	Distância escalada	Probabilidade de quebra de janelas	Estimativa de Feridos
Cortes em todos	50	5,39	100 %	44 %
Cortes em muitos	70-100	7,54 - 10,77	100 %- 95 %	26 % - 14 %
Cortes em alguns	100-150	10,77 – 16,15	95 % - 81 %	14 % - 8 %
Cortes raros	200	21,54	54 %	5 %

Segundo Jeffries (1997) este fator é a impulsão dado aos fragmentos pela onda de sobrepressão. Conforme TM-5-1300 a velocidade transmitida pela onda de sobrepressão ao fragmento é dada pela relação a seguir:

$$v = \frac{A}{M}(l_a - l_f)$$
 (5.10)

Onde:

v é a velocidade inicial dos fragmentos de vidro.

A é a área da vidraça exposta a onda de sobrepressão.

M é a massa de vidro.

la é a impulsão aplicada por unidade de área

If é a impulsão da quebra da janela por unidade de área

Pela equação acima podemos deduzir que quanto mais próximo a vidraça estiver do epicentro maior será a velocidade dos fragmentos, pois maior é o impulso fornecido pela onda de choque. Assim, para valores menores que 16 m/kg<sup>1/3</sup> o fator impulsão é o fator agravante de ferimento e mais preponderante que a probabilidade de quebra de vidro. Além de 16 m/kg<sup>1/3</sup> o fator preponderante parece ser a probabilidade de quebra de vidro.

Esta observação está de acordo com o proposto por Reed, J. W., que relatou os danos e ferimentos observados na explosão da PEPCON em 1988 com equivalente de 1 kton de explosão nuclear. Segundo Reed (1988) os ferimentos e

danos observados após a distância de segurança americana 19 m/kg<sup>1/3</sup> podiam ser ajustados com boa aproximação à curva de quebra de vidraças.

Pelo analisado, para indivíduos no interior de uma residência a distância escalada 22 m/kg<sup>1/3</sup> a probabilidade de ferimentos é estimada em 5,0 % sendo que metade destes feridos necessitarão de hospitalização, ou seja, 2,5 %. Este valor de distância escalada é o adotado na Inglaterra e em Países como França, Suíça, Noruega e outros países Europeus.

5.3- Relação entre quebra de vidraças e feridos.

Uma questão fundamental é a aplicabilidade deste critério de segurança para outros tipos de residência que não a familiar como asilos, creches, shopping centers, colégios, clubes, enfim locais onde há concentração de população e locais onde há maior predisposição aos efeitos adversos de uma explosão.

Kummer (2004) sugeriu a relação de dados apresentados na tabela 5.13 para relacionar a quebra de vidros com a probabilidade de lesões :

Probabilidade de			
Quebra de vidros	Lesões Leves	Lesões Severas	Óbito
100 %	100 %	10 %	1 %
50 %	10 %	1 %	0,1 %
1 %	0,1 %	0,01 %	0,001 %

Tabela 5.13: probabilidade de quebra de vidros e tipo de lesão

Kummer (2004) propôs uma classificação para as vidraças conforme a tabela 5.14 e com isto pode-se montar a tabela 5.15.

96

Tamanho de janelas	Área Exposta	Aplicação
Pequeno	< 1 m <sup>2</sup>	Residências
Médio	1-3 m <sup>2</sup>	Escritórios e Residências
Grande	> 3 m <sup>2</sup>	Escritórios, Shopping Centers, Locais Adensados

#### Tabela 5.14: Definição de Tamanho de Janelas.

Considerações adicionais:

- Espessura de 4 6 mm
- Vidraça normal (não laminada ou endurecida)
- Vidro moderno, com menos de 40 anos.

Tabela 5.15: Função Probit para o Caso de Quebra de janelas, Lesões Leves, Lesões

### Severas e Óbitos

		Tipo de Vidraças	
Evento	Pequena	Média	Grande
		Função Probit (*)	L
Quebra	-1,013+3,356 • In(P)	0,796+3,356 • In(P)	2,674 + 3,356 · ln(P)
	(eq. 5.11)	(eq. 5.12)	(eq. 5.13)
Lesões Leves	Exp(1,2855+0,01425-P <sup>1,5</sup> -6,484/P <sup>2</sup> )	Exp(1,5515+0,008064-P <sup>2</sup> -2,1878/P <sup>1,5</sup> )	Exp(1,556+0,02456 •P <sup>2</sup> -0,9554/P <sup>1,5</sup> )
	(eq. 5.14)	(eq. 5.15)	(eq. 5.16)
Lesões Severas	Exp(1,1995+0,002531·P <sup>1.5</sup> -8,773/P <sup>2</sup> ) ( eq. 5.17)	Exp(1,3791+0,0004512-P <sup>2</sup> -2,6251/P <sup>1.5</sup> ) (eq.5.18)	Exp(1,3942+0,0007816-P <sup>2</sup> -1,155 /P <sup>1.5</sup> ) (eq.5.19)
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
Óbitos	Exp(0,9597+0,001226-P <sup>1,5</sup> -11,630/P <sup>2</sup> ) (eq.5.20)	Exp(1,1023+0,0001550-P <sup>2</sup> -3,1628/P <sup>1.5</sup> ) (eq.5.21)	Exp(1,1076+0,0002735•P <sup>2</sup> -1,374 /P <sup>1.5</sup> ) (eq. 5.22)

(\*) Valores de P em kPa

Considerando a tabela 5.15 pode-se montar as tabelas 5.16 e 5.17.

Tabela 5.16: Quebra de Vidraças e Estimativa de Vítimas Resultantes com Lesões leves para algumas distâncias escalada

\_\_\_\_\_

		Quebra de Vidraças			Les	sões Leve	es
	Pressão	Pro	Probabilidade				
Z (SI)	kPa	Pequena	média	Grande	Pequena	média	Grande
11	27,614	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
22	11,067	98,00	99,99	100,00	78,70	100,00	100,00
44	4,188	11,38	72,66	99,34	1,48	21,50	93,66
60	2,699	0,37	19,16	84,28	0,03	2,59	33,45

# Tabela 5.17: Quebra de Vidraças e Estimativa de Vítimas Resultantes com Lesões Fatais e Severas, para algumas distâncias escalada

		Lesões Severas				Óbito	
Z (SI)	Pressão kPa	Pequena	média	Grande	Pequena	média	Grande
11	27,614	39,60	69,21	98,81	2,69	4,61	9,58
22	11,067	5,38	13,74	24,19	0,59	1,45	2,36
44	4,188	0,16	2,00	7,67	0,01	0,18	0,80
60	2,699	0,00	0,26	3,04	0,00	0,02	0,28

.

# Capítulo 6

### Efeito da Sobrepressão sobre Janelas

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Geralmente o dano mais associado ao evento de uma explosão é a quebra de vidraças. Isto ocorre devido ao tipo de vidro utilizado pela população. Tal material possui uma resistência mecânica muito pequena de modo que mesmo baixos níveis de intensidade de sobrepressão são capazes de gerar quebras ou fraturas. Assim, em decorrência de uma explosão a quebra de vidraças é observada em locais relativamente distantes do epicentro.

O risco para pessoas próximas a uma vidraça quebrada numa explosão dependerá de diversos fatores tais como tamanho e forma dos fragmentos, velocidade, distância percorrida e densidade de fragmentos por unidade de área.

Como já foi tratado anteriormente, em condições em que não haja possibilidade de desabamento, a probabilidade de óbito estará associada fortemente à quebra de vidraças.

Jeffries (1997) realizaram uma extensa pesquisa para o HSE visando o levantamento de curvas probabilísticas de fatalidade para ocupantes de construções sujeitas aos efeitos de onda de sobrepressão decorrentes de uma explosão. A equipe organizou a possibilidade de óbito em três grupos principais. Os dois primeiros grupos se referem à decorrência de desabamento, o terceiro grupo a quebra de vidraç**as**.

Basicamente, pode-se agrupar as abordagens para fatalidade decorrente de quebra de vidraças em dois grupos, que serão denominadas de abordagem individual e abordagem coletiva.

O primeiro tipo estabelece aspectos tais como o número de fragmentos e a distribuição de massa e velocidade para então prever o potencial de penetração e com isso a probabilidade de morte e ferimentos graves (Wilde, 2002 e Kummer, 2004).

O segundo grupo estuda o desenvolvimento da nuvem de fragmentos de vidro produzida pelo estilhaçamento da vidraça, de modo que a probabilidade de danos

está associada ao grau de cobertura pela nuvem de fragmentos produzida Meyer (2002) e Kummer (2004).

Em 1962 Glasstone, conforme relatado por Absil (1992) estudando os efeitos de explosões nucleares propôs que os efeitos de laceração de fragmentos de vidro estavam associados a sua capacidade de penetrar no corpo humano de modo semelhante a estilhaços metálicos. Assim, utilizou equações de balística terminal de fragmentos metálicos para prever a relação entre a massa e velocidade de vidro necessária para causar danos.

Para estabelecer um critério de velocidades críticas Glasstone fixou a massa média dos fragmentos em 10 gramas.

Na ocasião criou-se o critério do "pior caso de orientação", ou seja, que a quebra da vidraça produziria fragmentos pontiagudos e que essas pontas estariam orientadas no sentido de atingir o que estivesse após a janela.

Os modelos após Glasstone adotaram o critério do pior caso.

A tabela a seguir apresenta a proposição de Glasstone (1962), citado por Absil (1992).

	Vel	<u>ocidade de impacto (m</u>	/s)
Massa de fragmentos de vidro ( gramas)	Probabilidade de penetração de 1%	para obter <b>50%</b> de penetração (m/s)	para obter <b>99%</b> de penetração (m/s)
0,1	72	125	223
0,5	49	84	148
1,0	43	75	131
10	35	55	108

Tabela 6.1: Valores propostos por Glasstone em 1962.

A relação entre probabilidade de penetração, massa e velocidade podem ser relacionadas por uma equação do tipo:

$$\begin{split} P_{\text{prob}} &= \frac{1}{1 + e^{(-(C1 + C2 \text{ inC3})}} \\ \text{Onde :} \\ P_{\text{rob}} & \text{é a probabilidade} \\ \text{C1e C2 são constantes} \\ \text{C3} &= \frac{M_{\text{proj}}V^2}{10A_{\text{rea}}} \quad (\text{eq. 6.2}) \\ \text{sendo :} \\ M_{\text{proj}} &= \text{massa do projetil (kg)} \\ V &= \text{velocidade (m/s)} \\ A_{\text{rea}} &= \text{área frontal do projetil (m}^2) \end{split}$$

Para fragmentos com 10 g, Absil (1992) apresenta uma tabela ilustrativa da velocidade de fragmentos de vidros e o tipo de lesão esperada, conforme Tabela 6.2.

Tabela 6.2 : Estimativa de conseqüências pela velocidade de fragmento de 10 gramas de vidro, Absil (1992).

Efeito	Velocidade de Impacto (m/s)
Ferimentos Sérios:	
Cerca de 100%	92
50%	55
Limite mínimo	30
Limite mínimo de laceração	15

Deve ser notado que a estimativa feita se limita aos casos de impacto de 90° e pele nua. Neste caso Absil (1992) propõe o fragmento perigoso é aquele que tem penetração maior ou igual a 1,0 cm. Especula-se que a esta profundidade veias e artérias importantes seriam atingidas causando intenso sangramento.

Diversas correlações foram elaboradas desde Glasstone (1962), a fim de determinar parâmetros como velocidade e massa. Dentre os modelos mais difundidos encontra-se as equações de Jeffries (1997):

101

(6.1)

$$V = \left[0,2539 + 1,826.10^{-4} \left(h - 7,62.10^{-4}\right)^{-0.926}\right] \left[0,334.P_{e}^{0.547}\right] \text{ m/s}$$
e (6.3)

$$A_{res} = 6,4516.10^{-4} \exp\left[2,4 - \left(12,5 + \left(5,8566.10^{-5} P_{e}\right)^{2}\right)^{0.5}\right] m^{2}$$
(6.4)

Onde :

102

 $\mathsf{P}_{\!_{e}}$  é a pressão efetuada sobre o vidro [Pa]

h é a espessura do vidro [m]

Observou-se durante os experimentos que existe uma dispersão na velocidade dos fragmentos oscilando entre 0,6 e 1,5 vezes a velocidade média da nuvem explosiva.

A faixa de validade para  $P_e$  utilizando as equações 6.3 e 6.4 simultaneamente vai de 690 Pa até 9650 Pa a espessura do vidro precisa ser superior a 7,62  $\times 10^{-4}$  m.

Segundo Jeffries (1992) o TNO apresentou a seguinte equação em 1985 para determinar a área média dos fragmentos:

$$A = 834,16(100P_{e})^{-1,1772} cm^{2}$$
(6.5)

Embora o critério de ferimentos severos tenha sido proposto em 1962, o critério de fatalidade que considera 50% de penetração craniana e foi elaborado em 1980 após trabalhos de Fletcher et al com experimentos com cachorros e ovelhas vivas (Absil, 1998).

Com base nessas observações Jeffries (1997) propôs que o número de fragmentos perigosos poderia ser dados por:

$$N_{fp} = F_{fp} N_{T}$$
(6.6)  
Onde :

N<sub>fp</sub> = Numero de fragmentos perigosos

F<sub>fp</sub> = Fração de fragmentos perigosos

 $N_{T} = N$ úmero total de Fragmentos

Por fração de fragmentos perigosos entende-se a fração de fragmentos com probabilidade de penetração no crânio maior ou igual a 50%.

A probabilidade de fatalidade é proposta por:

$$\begin{split} P_{\text{prob}} &= 1 - \left(1 - P_{\text{fat}} P_{\text{fp}}\right)^{N_{\text{fp}}} & (6.7) \\ \text{Onde :} \\ P_{\text{fat}} &= \text{Probabilid} \text{ ade de fatalidade do fragmento} \\ P_{\text{fp}} &= \text{Probabilid} \text{ ade de ser atingido pelo fragmento} \\ N_{\text{fp}} &= \text{Numero de fragmentos perigosos} \end{split}$$

Probabilid ade total de fatalidade

Devido à grande quantidade de variáveis necessárias para descrever o comportamento dos fragmentos gerados na fragmentação de vidraças e a dificuldade de se relacionar essas condições com a probabilidade de fatalidade o Ministério da Defesa do Reino Unido estabeleceu o "Guia de Fragmentos Perigosos de Vidraças" (UK Glazing Hazzards Guide), citado por Jeffries (1997), que estabelece distâncias de arremesso como critério de segurança, conforme ilustrado na figura 6.1:

- Quebra Segura (ou Perigo reduzido) A distância máxima alcançada pelos fragmentos se situa até um metro da linha de centro da janela.
- Baixo risco Os fragmentos atingem uma distância de até 3 metros não excedendo a altura de 0,5 metros do piso a esta distância. Os ferimentos deverão se limitar às áreas baixas do corpo de modo que considerando tratamento médico, o risco de óbito não será considerado.
- Alto rísco Os fragmentos atingem de 0,5 metros a 3 metros de distância. Corte nas regiões superiores do corpo inclusive no pescoço e no rosto são esperados.

103



Figura 6.1: Desenho Esquemático das Zonas de Risco.

Como foi visto as causas de fatalidade podem ser separadas em dois grupos principais, o primeiro considerando desabamento da edificação, e o segundo baseando-se na fragmentação de vidraças.

Ocorre que os riscos associados à fragmentação de vidraças se estendem a uma distância muito maior do que a prevista para o desabamento da edificação, de modo que um experimento foi montado para se verificar aspectos associados a este fenômeno.

Inicialmente, deve-se considerar o modo com que os fragmentos são gerados. Neste caso a onda de sobrepressão atinge a superfície da vidraça causando fragmentação e aceleração destes, conforme figura 6.2.



Distância

Figura 6.2: Desenho esquemático da quebra de vidraças.

Embora os aspectos relacionados a fragmentação de vidraças como distribuição de tamanho de fragmentos, formas e impulsão tenham sido bastante estudados existe uma relativa carência de trabalhos com relação ao modo com gue os ferimentos são gerados.

O estudo em questão verificou os fenômenos associados ao impacto dos fragmentos gerados contra uma superfície capaz de manter uma memória de forma, visando esclarecer o modo com que os ferimentos são gerados.

#### 6.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A montagem do trabalho experimental consistiu no posicionamento de uma carga de massa de explosivo de variando de 500 g a 1000 g em frente a uma edificação, a uma distância variável de uma vidraça fixa em uma moldura metálica especial. A onda de sobrepressão gerada pela carga quebrava a vidraça e arremessava os fragmentos para dentro da edificação. Após a janela havia um sistema ótico acoplado a um cronômetro militar, de modo que no momento em que os fragmentos atravessavam o primeiro feixe de luz o cronômetro iniciava, após o segundo feixe o cronômetro parava. Considerando a distância entre os dois feixes e o tempo decorrido estimava-se uma velocidade inicial.

A nuvem de fragmentos formada atingia um painel contendo uma espurna rígida, de modo que parte dos fragmentos ficava retido na espurna e parte atingia e caia, deixando uma deformação.

105

Os painéis de vidro tinham dimensões de 80 x 60 cm e espessura de 3 mm e 6 mm. Foram adquiridos 20 painéis de cada tipo.

O sistema ótico consistia de dois conjuntos contendo um apontador e uma célula foto sensível distantes de 120 cm entre eles.

O painel de fixação da espuma era constituído por uma chapa de madeira de 180 cm x 240 cm. A espuma utilizada foi da marca Floral tipo E-5000. O painel formado com essa espuma cobria uma área de 120 cm x 120 cm.

O painel foi fixado a 2,0 metros da vidraça.

As células foto elétricas foram conectadas a um circuito eletrônico montado pelo Eng. Eletrônico Marcelo Aquino. Este circuito transmitia um sinal para o cronômetro.

O cronômetro utilizado foi montado na Fábrica de Materiais de Comunicação e Eletrônica – (FMCE) filial da IMBEL, situada no Bairro do Caju, Rio de janeiro. A precisão do equipamento é de  $\pm$  0,05 µs. Tal equipamento é utilizado na FPV-IMBEL para se verificar a velocidade de detonação dos explosivos fabricados.

#### 6.3 DESENVOLVIMENTO

O fenômeno pode ser descrito tornando-se por base a chegada da onda de sobrepressão na vidraça até a deformação final na espuma conforme as seguintes etapas:

- 1. Quebra das vidraças devido à ação da sobrepressão.
- 2. Aceleração dos fragmentos de vidro pela ação da sobrepressão.
- 3. Interação do deslocamento de ar com os fragmentos formados.
- 4. Impacto dos fragmentos com a espuma.

A espuma de poliuretano foi escolhida devido à sua pressão de compressão constante. Esta propriedade permite relacionar o volume total deformado com a energia cinética dos fragmentos. Desta forma pode-se escrever:

$$W = \Delta E_c \tag{6.8(a)}$$

107

$$W = \int_{0} [P_c.A] dx \qquad (6.8(b))$$

Se P<sub>c</sub> for constante :

$$W = P_c \cdot \int_0 A dx = P_c \cdot V$$
 (6.8(c))

$$\therefore P_{c} = \frac{W}{V} = \frac{\Delta E_{c}}{V}$$
(6.8(d))

Onde:

W = trabalho total realizado $\Delta E_c = variação de energia cinética$  $P_c = Pressão de compressão$ A(x) = Área da secção transversal em função da profundidade xx = Distância de profundidade, referenciada a superfície da espumaV = Volume (m<sup>3</sup>)

O valor de Pc foi estimado pela queda de um corpo metálico com dimensões e massa conhecidas de diferentes alturas contra a espuma, os resultados, média de três medidas para cada altura é apresentada no gráfico da figura 6.3 Pode-se verificar que a pressão de compressão é praticamente constante até uma profundidade de 4,5 cm.



Figura 6.3: Pressão de compressão da espuma e profundidade.

O procedimento adotado para verificar o volume de cada fragmento envolvia duas formas de análise:

1-) Primeiramente o volume era medido verificando-se a profundidade máxima atingida e a largura da superfície de modo a ajustar o fragmento para um triângulo com espessura igual da vidraça.

2-) Utilizando-se uma bureta de 50 ml uma quantidade de água era derramada e a diferença de massa era verificada. Neste caso a operação necessitava ser rápida pois parte da água acabava sendo absorvida pela espuma.

Com o volume mensurado e tendo o valor da pressão de compressão obtemos a energia cinética do fragmento de vidro conforme equação 6.8 (d). Utilizando o valor da massa do fragmento obtemos a velocidade de impacto do fragmento.

### 6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises dos impactos revelaram os seguintes aspectos:

i-) Os impactos horizontais com penetração, foram aqueles em que o ângulo de incidência em relação a espuma estava próximo de 90<sup>0</sup>. Estes se mostraram predominantes ao longo do eixo onde a carga foi posicionada. Talvez a turbulência nesta região seja tão intensa devido ao "efeito de sopro" (deslocamento de ar que se segue à onda de sobrepressão) que os fragmentos adquiriram estabilização aerodinâmica. A figura 6.4 ilustra esta observação.





ii-) Impactos verticais, foram aqueles em que o fragmento atingiu formando um ângulo próximo de 90<sup>°</sup> em relação a espuma. Alguns impactos deste tipo foram verificados ao longo do eixo, mas não foram predominantes. Contudo, conforme ocorria afastamento da linha do eixo da carga explosiva este tipo de impacto aparecia numa distribuição aleatória com fragmentos horizontais (ângulo de 0<sup>°</sup> em relação a espuma) e fragmentos inclinados, conforme figura 6.5.



Figura 6.5: Turbulência acentuada.

Quando o escoamento do ar deslocado atravessa a janela existe próximo as bordas da janela uma região de estagnação (velocidade 0). Devido a isto existe nesta região uma perda de carga bastante acentuada que cria uma região de turbulência bastante acentuada, onde não existe a estabilização aerodinâmica e por causa disto os impactos são aleatórios.

iii-) Os impactos com ângulo entre 0º e 90º seguiram as mesmas distribuições apresentadas no item (ii) devido as mesmas razões.

iv-) Alguns impactos apresentaram uma característica singular. Nesta situação alguns fragmentos que não dispunham de energia cinética suficiente para penetrar completamente na espuma receberam um impacto horizontal completando sua penetração. Ou seja, as maiores penetrações decorreram da colisão de um fragmento com outro transferindo sua energia cinética para aquela. Nesta condição os fragmentos maiores e horizontais (ângulo de 90 °) causaram as maiores penetrações.

Para este tipo de impacto usa-se a denominação de "prego-martelo" pela similaridade e necessidade de um impacto vertical, seguido de um impacto horizontal.

Outra observação foi uma relação entre a velocidade inicial dos fragmentos com a espessura da vidraça, uma vez mantida as condições de massa da carga explosiva e distância da vidraça. Neste caso verificou-se que ao reduzir-se a mesma de 6 mm para 3 mm a velocidade dobrava.

Na prática constatou-se uma transferência de quantidade de movimento da onda de sobrepressão para a vidraça, de modo que quanto menor a espessura maior a velocidade dos fragmentos. Em relação à energia cinética pode-se deduzir o seguinte:

Seja :

l a impulsão da onda de sobrepressão

m1 a massa de vidro da vidraça 1,

v<sub>1</sub> a velocidade média dos fragmentos de vidro da vidraça 1
 m<sub>2</sub> a massa de vidro da vidraça 2,

v<sub>2</sub> a velocidade média dos fragmentos de vidro da vidraça 2 Então :

Se 
$$m_1 = \frac{m_2}{2} = m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$$
 então  $v_2 = \frac{v_1}{2}$ 

Como a energia cinética é dada por :  $E_c = \frac{1}{2} .m.v^2$  tem – se :

Para vidraça 1:

$$E_{c1} = \frac{1}{2} . m_1 . v_1^2$$
 (6.9(a))

Para vidraça 2 :

$$E_{c2} = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot m_1) \cdot \frac{v_1^2}{4} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2\right) = \frac{E_{c1}}{2}$$
(6.9(b))

$$E_{c1} = 2.E_{c2}$$
 (6.9(c))

Deste modo, uma vez que a impulsão transmitida é constante, a energia cinética total da massa da vidraça como esperado aumenta com a redução da espessura da mesma. Considerando a velocidade inicial de 63 m/s e 6 mm de espessura foram plotados gráficos de razão de velocidades, (Figuras 6.6 e 6.7), que consistem na razão da velocidade do fragmento pela velocidade média de impacto, que neste caso foi de 9,68 m/s.



Figura 6.6: Razão de velocidade e massa de fragmentos

Considerando a velocidade inicial de 128 m/s e 3 mm de espessura montou-se gráficos de razão de velocidades, que consistem na razão da velocidade do fragmento pela velocidade média de impacto que neste caso foi de 7,74 m/s, ou seja, uma desaceleração mais elevada que no caso anterior.



Figura 6.7: Razão de velocidade e massa de fragmentos Os testes realizados forneceram os dados da tabela 6.8 e 6.9, sendo cada dado a média de dois testes:

Tabela 6.8: comparação entre as velocidades iniciais, razão entre a velocidade para espessura de 3 mm e a velocidade para espessura de 6 mm

1	Velocida	Razão	
	n	√s	entre as
Teste número	6 mm	3mm	velocidades
1	177	348	1,9661
2	123	243	1,9756
3	63	127	2,0159
4	49	100	2,0408
5	32 61		1,9063
Ra	1,9809		

UNICAMP BIRLIOTECA CENTRAL CÉSAR UNITES DESERVOINIELNYO DE COLAÇÃO

Carga		Vidraça	a de 6 mm 🛛 Vidraça de 3		de 3 mm
Massa					
TNT	Distância	Início		Início	
(kg)	(m)	(m/s)	Final (m/s)	(m/s)	Final (m/s)
1,00	1,00	177	26,06	348	20,62
1,00	1,60	123	19,23	243	15,00
0,250	1,25	63	9,68	127	7,69
0,250	1,60	49	7,93	100	5,93
0,250	2,00	32	4,54	61	3,61

Tabela 6.9: Resultado dos testes considerando velocidade inicial e final para vidraças de 3 e 6 mm de espessura, cada velocidade sendo a média de dois ensaios

Como se pode perceber, ao longo de 2 m ocorre uma desaceleração da nuvem de fragmentos muito intensa. Tal desaceleração é mais acentuada para fragmentos de menor espessura.

Embora a velocidade inicial para uma mesma impulsão tenha uma correspondência muito boa entre a velocidade inicial e a espessura da vidraça o mesmo não ocorre na velocidade final. Contudo as velocidades finais se aproximam para uma mesma impulsão. Isto se deve ao efeito do arrasto no ar. Para fragmentos maiores o efeito é menos pronunciado do que para fragmentos menores.

Desta forma, considerando-se a semelhança das velocidades finais então pode-se concluir que para o caso em questão a energia cinética dos fragmentos da vidraça de 3 mm a 2 mm foi cerca de duas vezes menor do que para vidraça de 6 mm.

Assim, apesar da maior energia inicial, fragmentos de vidraças de menor espessura tendem a ter uma desaceleração mais elevada.

Foi observado que abaixo de 49 m/s (para 6 mm de espessura) e 100 m/s (para 3mm de espessura) a velocidade final é tão pequena que poucas penetrações ocorreram.

Os dados relativos à impulsão, massa de TNT e distância são apresentados na tabela 6.10:

Massa (kg)	Distância (m)	Velocidade 6 mm	Velocidade 3 mm	Impulsão 6 mm (kg.m/s)	Impułsão 3 mm (kg.m/s)	Impulsão média (kg.m/s)	Distância Escalar
1	1,00	177	348	2548,8	2505,6	2527,2	1,0000
1	1,60	123	243	1771,2	1749,6	1760,4	1,6000
0,25	1,25	63	127	907,2	914,4	910,8	1,9843
0,25	1,60	49	100	705,6	720	712,8	2,5398
0,25	2,00	32	61	460,8	439,2	450,0	3,1748

Tabela 6.10: Dados de Impulsão e distância escalada, considerando a densidade do vidro em 2400 kg/m<sup>3</sup>.

O gráfico da Figura 6.8 ilustra a relação entre distância escalada e impulsão.



Figura 6.8: Relação entre Distância escalada e Impulsão.

Como pode ser verificado existe uma relação entre distância escalada e impulsão que pode ser ajustada para uma equação logarítmica, conforme a figura 6.9. O ajuste apresentou um coeficiente de correlação de 0,9659.



Figura 6.9: Equação logarítmica relacionando Impulsão e distância escalada.

# Capítulo 7

## Proposta de Novas Distâncias de Segurança

#### 7.1 INTRODUÇÃO

A legislação americana atual DoD 6055.9 prescreve uma distância escalada de 15,87 m/kg<sup>1/3</sup> para residências e 9,52 m/kg<sup>1/3</sup> para rodovias, para massa de explosivos menores que 40 t, e 19,84 m/kg<sup>1/3</sup> para edifícios e 11,9 para rodovias, para o caso de massa de explosivos entre 40 e 113 t. A legislação Inglesa, prescreve para residências 22 m/kg<sup>1/3</sup> e para rodovias 13,2 m/kg<sup>1/3</sup>, Moreton (2000).

As legislações da Noruega, Dinamarca e Suíça estabelecem para residências 22 m/kg<sup>1/3</sup> e para escritórios, escolas, hospitais e demais estabelecimentos 44 m/kg<sup>1/3</sup> Sigbjorn (2002).

No caso de não utilização de barricadas a legislação brasileira apresenta valores menores de distância escalada que a americana a partir de 40 t de explosivos. Já no caso da legislação Inglesa esta discrepância ocorre a partir de 21 t.

No caso de utilização de barricadas, a legislação brasileira apresenta valores menores de distância escalada que a legislação americana a partir de 7 t de explosivos. E todos os valores da legislação brasileira para este caso são menores que a legislação inglesa.

Como as legislações européias analisadas seguem a legislação inglesa, pode-se dizer que, com a utilização de barricadas, as distâncias de segurança brasileiras são menores que as européias. O mesmo pode ser dito a partir de 7 t para a legislação americana.

Assim, pode-se ainda dizer que a legislação brasileira permite na condição de uso de barricadas que sejam adotadas as menores distâncias de segurança do mundo.

O uso de taludes ou barricadas é oriundo da tabela Americana de Distâncias - "American Table of Distances" – (Lyman, 1986) mas como já foi visto, em estudos realizados no final da década de 60, a utilização de barricadas não permite a redução das distâncias de segurança em 50%.

# 7.2 EFEITO DE ATENUAÇÃO DA SOBREPRESSÃO PELA PRESENÇA DE TALUD**ES**

A redução da distância de segurança ocorreria neste caso devido a absorção da energia da explosão pela estrutura do paiol e pelo direcionamento da explosão. Tal atenuação é comumente representada por um fator de correção que ajusta a carga original para uma carga equivalente de TNT hemisférica. Para o caso de uma redução de 50% na distância de segurança ter-se-á:

Seja P<sub>ibd</sub> pressão incidente na IBD, a uma distância escalada Z, de massa de TNT representada por M e uma distância IBD.

Para que houvesse uma redução de 50 % na IBD, teríamos que a pressão incidente nesta distância que podemos denominar de P<sub>IBD ½</sub> seja igual ao valor de P<sub>ibd</sub>. Como a pressão incidente é uma função da distância escalada teremos que:

Como P = f(z), Se

$$P_{IBD} = P_{IBD1/2} \implies Z_{IBD} = Z_{IBD1/2} \implies \frac{IDB}{(M)^{1/3}} = \frac{IBD/2}{(\varphi \cdot M)^{1/3}}$$
(7.1)

onde  $Z_{IBD}$  é a distância escalada na IBD e  $Z_{IBD/2}$  é a distância escalada a ½ IBD. Ocorre que como a pressão incidente é a mesma nas duas distâncias então o valor das distâncias escaladas são similares. O fator  $\varphi$  é o fator de correção que ajusta a carga original para uma carga equivalente de TNT hemisférica. Para o caso acima, resolvendo a igualdade, este fator deverá valer 1/8. Como veremos adiante, o valor do fator de correção atinge um mínimo de 1/3.

Somente paióis subterrâneos apresentam um grau de absorção da magnitude de 7/8.

Embora a presença de barricadas auxilie na redução da energia liberada pela explosão, este fenômeno não está devidamente compreendido. Em 2004,

após uma série de experimentos realizados no deserto de Woomera na Austrália, constatou-se que os valores apresentados no programa de simulação americano "Blast Effects Computer V.4" para atenuação da onda de sobrepressão eram compatíveis com os valores empíricos encontrados.

O programa "Blast Effects Computer V.4" desenvolvido pelo Dr. Michael Swisdank foi elaborado a partir do histórico de testes de explosão em paióis realizados nos EUA (Experimentos da serie "Eskimo") e em testes realizados no Deserto de Woomera desde 1996.

O "Blast Effects Computer V.4" considera um paiol padrão (ECM – "Earth Covered Magazine") que possui barricadas laterais e traseira contendo taludes de terra de 3,0 m de espessura e 2,9 metros de altura.

Para este tipo de construção o "Blast Effects Computer V.4" realizou as seguintes estimativas, relacionadas na tabela 7.1:

	Massa de TNT ( kg)						
	100.000	50.000	20.000	10.000	5.000	2.000	1.000
Distância do Epicentro do Paiol (metros)		em	Massa Eo carga hemisf	quivalente de érica na distâ	TNT (kg) Incia conside	rada	
100	36.871,0	23.891,7	12.648,8	7.381,2	4.069,0	1.685,5	805,5
200	70.648,0	39.689,0	16.880,6	8.226,8	3.779,6	1.252,9	523,1
300	83.309,2	42.052,1	15.514,4	6.851,8	2.904,7	907,1	
400	83.505,3	39.075,7	13.202,2	5.555,7	2.300,6	735,3	330,0
500	78.402,9	34.814,5	11.181,6	4.630,8	1.939,6	660,0	330,0
600	71.682,2	30.738,0	9.638,3	4.016,3	1.741,1	660,0	330,0
700	64.970,4	27.267,5	8.513,6	3.626,4	1.650,0	660,0	330,0
800	58.898,3	24.449,6	7.716,3	3.399,2	1.650,0	660,0	330,0
900	53.649,3	22.213,9	7.169,9	3.300,0	1.650,0	660,0	330,0
1000	49.217,9	20.466,5	6.819,0	3.300,0	1.650,0	660,0	330,0

Tabela 7.1: Massa de TNT dentro do paiol e Massa de Equivalente a diversas distâncias estimada pelo "Blast Effects Computer V.4"

Analisando-se a tabela acima verifica-se que a partir do epicentro da explosão a massa equivalente de TNT hemisférica varia bastante. Isto se deve a fatores relacionados ao desenvolvimento fluidodinâmico da frente de onda de sobrepressão. Para verificar a existência de uma relação entre a massa equivalente de TNT hemisférico com a distância escalada procede-se da seguinte maneira: Inicialmente divide-se a massa de TNT equivalente hemisférico pela massa real obtendo-se um fator adimensional que é relacionado com a sua respectiva distância escalada. Em seguida coloca-se em ordem crescente as distâncias escalada e ao lado destas os fatores encontrados. Desta forma monta-se a tabela 7.2.

			Distância	
Distância Escalada	Equivalência de carga		Escalada	Equivalência de carga
m/kg <sup>1/3</sup>	hemisférica de TNT	] [	m/kg <sup>1/3</sup>	hemisférica de TNT
2,15	0,3687		18,57	0,5556
2,71	0,4778		19,00	0,5454
3,68	0,6324		19,39	0,5365
4,31	0,7065		21,54	0,4922
4,64	0,7381		21,72	0,4890
5,43	0,7938		22,10	0,4819
5,85	0,8138	]	23,21	0,4631
6,46	0,8331		23,39	0,4601
7,37	0,8440		24,43	0,4443
8,14	0,8410		25,79	0,4257
8,62	0,8351	]	27,14	0,4093
9,28	0,8227		27,85	0,4016
10,77	0,7840		29,24	0,3879
10,86	0,7815		29,47	0,3858
11,05	0,7757		32,49	0,3626
11,70	0,7559		33,16	0,3585
12,93	0,7168		35,09	0,3482
13,57	0,6963		36,84	0,3410
13,92	0,6852		37,13	0,3399
14,74	0,6601		40,94	0,3300
15,08	0,6497		41,77	0,3300
16,29	0,6148		46,42	0,3300
17,24	0,5890		46,78	0,3300
17,54	0,5809		52,63	0,3300
18,42	0,5591		58,48	0,3300

Tabela 7.2: Distância escalada e respectivo fator de Equivalência de carga hemisférica de

TNT

O gráfico da figura 7.1 ilustra o comportamento da relação entre a distância escalada e respectivo fator de Equivalência de carga hemisférica de TNT.



Figura 7.1: Comportamento da relação entre a distância escalada e respectivo fator de Equivalência de carga hemisférica de TNT.

Analisando o gráfico pode-se verificar que o fator atinge um máximo entre as distâncias escalada 7 e 8 m/kg<sup>1/3</sup> e um mínimo que se mantém constante após a distância escalada 40 m/kg<sup>1/3</sup>.

Esse gráfico permite elaborar um conceito que seria a distância escalada "corrigida" pelo uso de barreiras. Ou seja, pode-se usar o fator de correção da carga hemisférica equivalente de TNT para determinar um grau de atenuação. De modo a estabelecer uma relação entre as massas de explosivo para os casos de explosão em campo aberto e explosão atenuada por talude. Desta forma, partindo da igualdade:

Pressão sem barricada = Pressão com barricada, temos :

$$P(Z_{\text{Sem barricada}}) = P(Z_{\text{corrigido}}) \Rightarrow Z_{\text{Sem barricada}} = Z_{\text{corrigido}}$$
(7.2(a))

$$\therefore \frac{d_{\text{sem barricada}}}{M^{1/3}} = \frac{d_{\text{com barricada}}}{(\varphi.M)^{1/3}} \Rightarrow \frac{d_{\text{sem barricada}}}{M^{1/3}} = \frac{1}{\varphi^{1/3}} \cdot \frac{d_{\text{com barricada}}}{(.M)^{1/3}}$$
$$\Rightarrow Z_{\text{sem barricada}} = \frac{1}{\varphi^{1/3}} \cdot Z_{\text{com barricada}}$$
$$\therefore Z_{\text{sem barricada}} = \frac{1}{\varphi^{1/3}} \cdot Z_{\text{com barricada}}$$
(7.2(b))

A tabela abaixo ilustra valores de equivalência entre as distâncias escalada.

Tabela 7.3: Distâncias escalada sem t	talude e	distância	escalada	corrigida	para o	caso c	lę
	taluo	de					

Distância escalada m/kg <sup>1/3</sup>	Distância escalada Corrigida (m/kg <sup>1/3</sup> )	Distância escalada m/kg <sup>1/3</sup>	Distância escalada Corrigida (m/kg <sup>1/3</sup> )
2,2	3,0	18,6	22,6
2,7	3,5	19,0	23,3
3,7	4,3	19,4	23,9
4,6	5,1	21,7	27,6
5,4	5,9	22,1	28,2
5,9	6,3	23,2	30,0
6,5	6,9	23,4	30,3
7,4	7,8	24,4	32,0
8,1	8,6	25,8	34,3
8,6	9,2	27,1	36,6
9,3	9,9	27,9	37,7
10,8	11,7	29,2	40,1
10,9	11,8	29,5	40,5
<b>1</b> 1,1	12,0	32,5	45,6
11,7	12,8	33,2	46,7
12,9	14,4	35,1	49,9
13,6	15,3	36,8	52,7
13,9	15,8	37,1	53,2
14,7	16,9	40,9	59,2
15,1	17,4	41,8	60,4
16,3	19,2	46,4	67,2
17,2	20,6	46,8	67,7
17,5	21,0	52,6	76,2
18,4	22,4	58,5	84,6

Com base na tabela 7.3 pode-se propor para o caso da utilização de taludes os seguintes fatores de distância escalada da tabela 7.4.

Distância escalada Sem Talude m/kg <sup>1/3</sup>	Distância escalada Com talude (m/kg <sup>1/3</sup> )	Redução
22	18	81,82%
44	32	72,73%
60	41	68,33%

Tabela 7.4: Distância escalada com e sem Talude

No caso da distância americana de 15,8 m/kg<sup>1/3</sup>, com talude poderíamos passar para 13,9 m/kg<sup>1/3</sup>.

7.3 DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA CONSIDERANDO O EQUIVALENTE TNT

Outro fator relevante para alteração das distâncias escaladas se baseia no equivalente TNT.

Um modo de se estimar o equivalente TNT consiste em dividir a energia de combustão por unidade de massa pela energia de combustão do TNT por unidade de massa, conforme a tabela 7.5.

Tipo de material Energético	Equivalente TNT	
Pólvora Negra	0,45	
Pólvora BS	0,55	
Pólvora BD	0, <u>2</u> 0-0,60	
Nitrato de Amônio	0,14-0,86	
Pirotécnicos	0,14	
TNT	1,0	
PETN		
HMX	1,8	

Tabela 7.5: Equivalente TNT, Moreton (2000) e Smith (1995)

No caso de pólvoras e propelentes pode-se admitir um fator de equivalência com TNT de 0,50, visto que a pólvora negra apresenta uma alta sensibilidade a estímulos externos para iniciação e que as pólvoras de base simples (BS) e de base dupla (BD) explodem somente quando armazenadas em paióis com reduzida área de ventilação.

No caso do nitrato de amônio, tanto o tipo de iniciação como a umidade presente no produto influenciam bastante no desempenho da explosão.

Em explosões não confinadas parte do nitrato de amônio costuma ser arremessada sem participar da explosão de modo que o equivalente pode variar de 0,14 a 0,86. Neste caso, leva-se em conta que o número de acidentes com manuseio de nitrato de amônio é demasiadamente pequeno devido a sua reduzída sensibilidade à iniciação, pode-se considerar, para nitrato de amônio estocado em sacos plásticos, um equivalente TNT de 0,50.

Para altos explosivos com equivalente TNT maior do que 1,0 pode-se supor que, devido ao custo destes produtos e a segurança envolvida em sua armazenagem que a sua incidência de acidentes seja reduzida, de modo que o equivalente TNT seja adotado como 1,0.

Assim, para explosivos comerciais como emulsão e assemelhados podemos considerar um equivalente TNT igual a 1,0.

A tabela 7.6 ilustra os valores de distância escalada considerando o equivalente TNT e o efeito de barricadas, A tabela apresenta ainda uma comparação com os valores adotados em algumas legislações.

# Tabela 7.6: Distâncias escalada para Altos e Baixos Explosivos para o caso de sem e com Talude

	Alter Ex		Г <u> </u>			
	Explosivos militz	ares como TNT	Baixos Explosivos			
	PETN HMX RD	X entre outros e	Explosivos como Pólvora Neora			
	Explosivos Cometr	ciais: fino Emulsão	Nitrato de Amônio ANEO e Pólyoras			
1	e din:	e dinamite		BS e BD		
	Distância					
Critério	Ecolodo					
Cilleno	Com Teludo	Dietônoie	Diotônoio	Diotônoin		
1		Distancia		Distancia		
[	т/кд	Escalada	Escalada	Escalada		
	(Distâncias	Com talude	Sem lalude	Com talude		
	( Originais)	( m/kg "`)	( m/kg '' *	(m/kg***)		
				<u> </u>		
	Distâncias					
	Originais	I	Distâncias Proposta	s		
Distância escalada						
Americana	15,8	13,9	12,5	11,5		
Distância escalada						
Inglesa (Européia)	22	18	17,5	15		
Distância escalada						
Norueguesa,						
Dinamarquesa e	44	32	35	26		
Suiça para outros						
Estabelecimentos	ļ					
Distância Escalada			· · <b></b>			
proposta para						
Hospitais, creches,	60	41	47	34		
Asilos, Prédios						
Comerciais.						
Shopping Centers						

.

.

7.4 COMPARAÇÃO DAS DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA COM AS PREVISTAS NO R-105.

A legislação brasileira emprega o "Regulamento para fiscalização de produtos controlados", decreto 2.665, 10 novembro de 2000, para estabelecer as distâncias de segurança. Alguns valores deste regulamento são apresentados na tabela 7.7.

Massa de Explosivo Kg	Distância Metros	Distância de segurança SD	Distância de segurança Com Talude SD/2
20	90	33,16	16,58
50	120	32,57	16,29
90	145	32,36	16,18
140	170	32,74	16,37
170	180	32,49	16,25
230	200	32,64	16,32
270	210	32,49	16,25
320	220	32,16	16,08
360	230	32,33	16,17
410	240	32,31	16,15
460	250	32,39	16,19
680	285	32,41	16,20
910	310	31,99	16,00
1720	385	32,13	16,07
2271	420	31,95	15,98
3180	470	31,96	15,98
3630	490	31,88	15,94
4049	510	32,00	16,00
4540	530	32,01	16,00
6810	545	28,75	14,38
11350	610	27,14	13,57
13620	610	25,54	12,77
15890	610	24,26	12 <u>,</u> 13
18160	610	23,21	11,60
20430	610	22,31	11,16
22700	610	21,54	10,77
24970	610	20,87	10,44_
27240	610	20,27	10,14
29510	610	19,74	9,87
30780	610	19,46	9,73
34050	610	18,82	9,41
36320	610	18,42	9,21
38590	610	18,05	9,03
40860	610	17,71	8,86

Tabela 7.7: Distâncias de Segurança do R105

Massa de Explosivo Kg	Distância Metros	Distância de segurança SD	Distância de segurança Com Talude SD/2
43130	610	17,39	8,70
45400	610	17,10	8,55
56750	610	15,87	<u>7,94</u>
68100	610	14,94	7,47
79450	610	14,19	7,09
90800	620	13,79	6,90
102150	640	13,69	6,85
113500	660	13,63	6,82

Comparando as distâncias de segurança propostas com a do R-105 podese montar a tabela 7.8.

Tabela 7.8: Quantidade de Explo	sivo Máxima em qu	ie se encontra conformidade	com o R-
	105		

Caso	Distância Escalada	Conformidade até
Alto Explosivo distância original Americana sem talude	15,8	56.750 kg
Alto Explosivo distância original Americana com talude	13,9	11.350 kg
Baixo Explosivo distância original Americana sem talude	12,5	113.500 kg
Baixo Explosivo distância original Americana com talude	11,5	18.160 kg
Alto Explosivo distância original Européia sem talude	22	20.430 kg
Alto Explosivo distância original Européia com talude	18	0,0
Baixo Explosivo distância original Européia sem talude	17,5	43.130 kg
Baixo Explosivo distância original Européia com talude	15	4.540 kg

Analisando a tabela 7.8, entende-se que a legislação brasileira contempla bem a distância escalada para residências no caso de não utilização de talude.

O problema ocorre com a possibilidade de redução pela metade da distância de segurança devido ao uso de taludes.

Neste caso os valores ficam muito abaixo da legislação européia.

Quando se compara os dados acima com a legislação americana a conformidade aumenta. Contudo esta legislação se referencia em danos materiais enquanto que a legislação européia ao risco de morte.

#### 7.5 RISCOS INERENTES À ATUAL LEGISLAÇÃO

Para melhor compreender os riscos inerentes à legislação brasileira considerando os altos explosivos montou-se os gráficos das figuras 7.2 e 7.3 à seguir:

O gráfico 7.2 ilustra os valores das distâncias de segurança com a quantidade em massa de explosivo estocado para os casos com e sem barricada.



Figura 7.2: Distância de segurança para os casos com e sem barricada.


Figura 7.3 Distância escalada e massa de explosivos com a variação de massa explosiva para os casos com e sem barricada.

Para analisar o efeito da utilização dos valores do R-105 em condições com e sem barricada no caso de altos explosivos utiliza-se as correlações para previsão de óbitos, ferimentos, quebra de janelas e ruído. Para o caso de distância de segurança com barricada utiliza-se os valores de metade da distância de segurança, conforme critério da legislação brasileira, corrigidos pelo inverso da raiz cúbica do fator de equivalência de massa de carga hemisférica de TNT. As tabelas 7.4 a 7.9 relacionam as diversas distâncias escalares com os efeitos mencionados.



Figura 7.4: Probabilidade de Óbito com a massa de explosivo para os casos com e sem barricada

Pela figura 7.4 observa-se que as distâncias atuais com taludes oferecem um maior risco de morte do que as distâncias sem talude, sendo que o risco aumenta com o aumento da massa de explosivo considerada.





O risco de feridos requerendo hospitalização, conforme figura 7.5, praticamente triplica com o uso de taludes, podendo chegar a 25% de feridos hospitalizados.

Considerando as figuras 7.4 e 7.5, pode-se verificar que o efeito do uso de taludes causa um resultado inverso do esperado, ou seja, ao invés de reduzir os riscos acaba aumentando o potencial de perigo.

Nos gráficos 7.6 e 7.7 verifica-se que a probabilidade de quebra de vidraças e conseqüentes ferimentos aumentam muito com o aumento de massa de explosivo e emprego de taludes. Assim, o impacto da onda de sobrepressão trará conseqüências mais acentuadas quanto maior for a massa de explosivos e com o emprego de taludes.

Nas figuras 7.8 e 7.9 pode-se observar o elevado nível de ruído para fora e dentro das edificações.

As tabelas 7.9 e 7.10 reúnem todos os dados utilizados na elaboração dos gráficos apresentados.



Figura 7.6: Probabilidade de Quebra de janelas na distância de segurança sem a utilização de barricadas.



Figura 7.7: Probabilidade de Quebra de janelas na distância de segurança com a utilização de barricadas



Figura 7.8: Ruído causado pela Explosão fora das edificações.



Figura 7.9: Ruído causado pela Explosão dentro das edificações

Massa de	Distância	SD	Feridos	Óbito	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Ruído	
Explosivos	Minima	m/kg <sup>1/3</sup>	%	%	%	%	%	Externo	Ruído
kg	metros			·····	l			dB	Interno dB
20	90	33,2	2,16	0,0077	13,9	90,2	100,0	169,3	141,6
50	120	32,6	2,25	0,0082	14,9	91,4	100,0	169,6	141,7
90	145	32,4	2,28	0,0084	15,3	91,8	100,0	169,6	141,7
140	170	32,7	2,22	0,0080	14,6	91,1	100,0	169,5	141,7
170	180	32,5	2,26	0,0082	15,0	91,5	100,0	169,6	141,7
230	200	32,6	2,24	0,0081	14,8	91,2	100,0	169 <u>,5</u>	141,7
270	210	32,5	2,26	0,0082	15,0	91,5	100,0	169,6	141,7
320	220	32,2	2,31	0,0085	15,6	92,1	100,0	169,7	141,7
360	230	32,3	2,28	0,0084	15,3	91,8	100,0	169,7	141,7
410	240	32,3	2,29	0,0084	15,4	91,9	100,0	169,7	141,7
460	250	32,4	2,28	0,0083	15,2	91,7	100,0	169,6	141,7
680	285	32,4	2,27	0,0083	15,2	91,7	100,0	169,6	141,7
<u>1350</u>	<u>3</u> 55	<u>32,1</u>	2,32	0,0086	15,7	92,2	100,0	169,7	141,7
<u>172</u> 0	385	32,1	2,32	0,0086	15,7	92,2	100,0	169,7	141,7
2271	420	32,0	2,35	0,0087	16,0	92,5	100,0	169,8	141,8
2721	445	31,9	2,36	0,0088	16,2	92,6	100,0	169,8	141,8
<u>31</u> 80	470	32,0	2,34	0,0087	16,0	92,5	100,0	16 <u>9,8</u>	141,8
3630	490	31,9	2,36	0,0088	16,2	92,6	100,0	169 <u>,</u> 8	141,8
4049	510	32,0	2,34	0,0087	15,9	92,4	100,0	<u>169,8</u>	141,8
4540	530	32,0	2,34	0,0087	15,9	92,4	100,0	169 <u>,</u> 8	141,8
6810	<u>5</u> 45	28,8	2,93	0,0128	23,9	96,7	100,0	<b>1</b> 71 <u>,</u> 2	142,3
9080	595	28,5	2,98	0,0132	24,7	97,0	100,0	171,3	142,3
11350	610	27,1	3,28	0,0158	29,6	<u>9</u> 8,2	100,0	172,0	142,6
13620	610	25,5	3,68	0,0198	36,4	100,0	100,0	172,8	142,9
15890	610	24,3	4,04	0,0240	42,3	100,0	100,0	173,5	143,1
18160	610	23,2	4,36	0,0284	46,8	100,0	100,0	174 <u>,</u> 1	143,3
20430	<u>610</u>	22,3	4,67	0,0329	49,8	_100,0	100,0	174,6	143,5
22700	610	21,5	4,95	0,0376	51,8	100,0	100,0	175 <u>,</u> 1	143,7
24970	<u>610</u>	20,9	5,22	0,0425	54,7	100,0	<u>100,0</u>	175 <u>,5</u>	143,8
27240	610	20,3	5,48	0,0475	57,8	100,0	<u>100,0</u>	175 <u>,9</u>	144,0
29510	610	19,7	5,72	0,0526	60,8	100,0	100,0	176,3	144,1
30780	610	19,5	5,86	0,0555	62,4	100,0	<u>100,0</u>	<u>176,4</u>	144,2
34050	610	18,8	6,18	0,0633	66,3	100,0	100,0	176,9	144,3
	<u>610</u>	18,4	6,40	0,0688	<u>68,7</u>	100,0	100,0	177,2	144,4
38590	<u>    610     </u>	18,1	6,61	0,0744	70,8	100,0	100,0	<u>    177,5                               </u>	144,5
40860	610	17,7	6,81	0,0801	72,8	100,0	<u>100,0</u>	177 <u>,7</u>	144,6
43130	<u>610</u>	17,4	7,01	0,0860	74,5	100,0	100,0	177,9	144,7
45400	610	17,1	7,20	0,0919	76,1	100,0	100,0	178,2	144,8
<u>5675</u> 0	<u>6</u> 10	15,9	8,09	0,1231	82,0	100,0	<u>1</u> 00,0	179 <u>,2</u>	145,2
68100	610	14,9	8,89	0,1565	85,7	100,0	100,0	180,0	145,5
79450	610	14,2	9,63	0,1920	88,2	100,0	100,0	180,7	145,7
90800	620	13,8	10,06	0,2149	89,4	100,0	100,0	<b>1</b> 81,0	145,8
102150	640	13,7	10,17	0,2214	89,7	100,0	100,0	181,1	145,9
113500	660	13,6	10,24	0,2253	89,9	100,0	100,0	181,2	145,9

Tabela 7.9: Estimativas considerando a distância de segurança sem talude

\_\_\_\_\_

Massa de	Distância	SD	Feridos	Óbito	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Ruído	Ruído
Explosivos	Minima	m/kg <sup>1/3</sup>	%	%	%	%	%	Externo	linterno
kg	metros							dB	dB
20	<u> </u>	16,6	7,56	0,1038		100,0	100,0	178,6	144,9
50	120	16,3	7,77	0,1113	80,1	100,0	100,0	178,8	145,0
90	145	16,2	7, <u>85</u>	0,1142	80,6	100,0	100,0	178,9	145,1
	170	16,4	7,71	0,1090	79,8	100,0	100,0	178,8	145,0
170	<u>180</u>	16,2	7,80	0,1123	80,3	100,0	100,0	178,9	145,0
230	200	16,3	7,75	0,1103	80,0	100,0	100,0	178,8	145,0
270	210	16,2	7, <b>80</b>	0,1124	80,3	100,0	100, <u>0</u>	178,9	145,0
320	220	<u>16,1</u>	7,93	0,1169	81,1	100,0	100,0	<u>179,0</u>	145,1
360	230	16,2	7,86	0,1146	80,7	100,0	100,0	178,9	145,1
410	240	16 <u>,2</u>	7,87	0,1149	80,8	100,0	100,0	17 <b>8</b> ,9	145,1
460	250	16,2	7,84	0,1138	80,6	100,0	100,0	17 <u>8,9</u>	145,1
680	285	16,2	7,83	0,1135	80,5	100,0	100,0	178,9	<u>145,1</u>
1350	355	16,1	7,94	0,1175	81,2	100,0	100,0	<u>179,0</u>	145,1
1720	385	16,1	7,94	0,1174	81,2	100,0	100,0	179,0	145,1
2271	420	16,0	8,01	0,1200	81,6	100,0	100,0	179,1	145,1
2721	445	15,9	8,04	0,1212	81,7	100,0	100,0	179,1	145,1
3180	<u>47</u> 0	16,0	8,01	0,1199	81,5	100,0	100, <u>0</u>	179,1	145,1
3630	490	15,9	8, <b>04</b>	0,1210	81,7	100,0	100,0	179,1	145,1
4049	510	16,0	7,99	0,1193	81,5	100,0	100, <u>0</u>	179,1	145,1
4540	530	16,0	7,99	0,1192	81,4	100,0	100,0	179,1	145,1
6810	545	14,4	9,43	0,1822	87,6	100,0	100,0	180,5	145,6
9080	595	14,3	9,55	0,1882	88,0	100,0	100,0	180,6	145,7
11350	610	13,6	10,31	0,2293	90,0	100,0	100,0	181,3	145,9
13620	610	12,8	11,33	0,2925	92,1	100,0	100,0	182,1	146,2
15890	<u>610</u>	12,1	12,27	0,3596	93,5	100,0	100,0	182,8	146,5
18160	610	11,6	<u>13,14</u>	0,4304	94,5	100,0	100,0	183,4	146,7
20430	610	11,2	13, <del>9</del> 7	0,5044	95,3	100,0	100,0	183,9	146,9
22700	610	10,8	14,76	0,5816	96,0	100,0	100,0	184,4	147,0
24970	610	10,4	1 <u>5,51</u>	0,6617	96,5	100,0	100,0	184,8	147,2
27240	610	10,1	16 <u>,</u> 23	0,7445	96,9	100,0	100,0	185,2	147,3
29510	610	9,9	16,92	0,8300	97,3	100,0	100,0	185,5	147,5
30780	610	9,7	17,30	0,8789	97,5	100,0	100,0	185,7	147,5
34050	610	9,4	18,24	1,0082	97,9	100,0	100,0	186,2	147,7
36320	610	9,2	18,86	1,1008		100,0	100,0	186,4	147,8
38590	610	9,0	<u>19,47</u>	1,1956	98,4	100,0	100,0	186,7	147,9
40860	610	8,9	20,06	1,2925		1 <b>00</b> ,0	100,0	187,0	148,0
43130	610	8,7	20,64	1,3915	100,0	100,0	100,0	187,2	148,1
45400	610	8,5	21,20	1,4924	100,0	100,0	100,0	187,4	148,2
56750	<u>610</u>	7,9	23,81	2,0247	100,0	100,0	100,0	188,4	148,5
68100	610	7,5	26,15	2,5987	100,0	100,0	100,0	189,3	148,8
79450	610	7,1	28,26	3,2099	100,0	100,0	100,0	189,9	149,1
90800	620	6,9	29,48	3,6054	100,0	100,0	100,0	190,3	149,2
102150	640	6,8	29,81	3,7186	_100,0	100,0	100,0	190,4	149,2
113500	660	6,8	30,00	3,7857	100,0	100,0	100,0	190,5	149,3

# Tabela 7.10: Estimativas considerando a distância de segurança com talude

## 7.6 DISTÂNCIAS ESCALADAS SUGERIDAS PARA DIVERSOS TIPOS DE PÚBLICO

Com base nos gráficos acima e tendo em consideração o tipo de público encontrado nos diversos estabelecimentos, montou-se a tabela 7.11.

Distância	
Escalada	Publico indicado para utilização da distância escalada:
Sem Talude	
22 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a 5 % de ferimentos que necessitarão de atendimento médico e hospitalização, havendo reduzida probabilidade de óbito. Existirá necessidade de evacuação de feridos. Para minimizar o número de feridos é importante que nestas áreas não haja locais típicos de concentração de pessoal como clubes, cinemas, escolas entre outros, nem locais onde haja publico de risco como creches e asilos. Bairros estritamente residenciais apresentam características de menor concentração e menor quantidade de público de risco como idosos e crianças e portanto podem estar situados dentro desta distância escalada. Cabe ressaltar que os danos causados serão alvos de processos judiciais
	cujo valor total envolvido pode causar o fechamento definitivo do negócio.
44 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a 1 % de ferimentos não havendo probabilidade de óbito mas grande possibilidade de pânico devido a quebra de janelas e estruturas de gesso. Existirá necessidade de evacuação de feridos e do pessoal em pânico. Devido ao reduzido número de feridos é possível localizar nestas áreas empreendimentos onde haja concentração de pessoal como clubes, igrejas, cinemas, escolas entre outros. Contudo, esta distância é imprópria para a população mais sensível fisicamente a risco como creches, hospitais e asilos, como para população situada em empreendimentos mais sensíveis aos efeitos das ondas de sobrepressão, que podem resultar em aumento considerável de feridos, como prédios contendo grandes fachadas de vidros como shopping centers e prédios comerciais.
60 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a reduzida probabilidade de ferimento. Ideal para público sujeito a condições especiais como asilos, hospitais e creches e para empreendimentos mais sensíveis aos efeitos das ondas de sobrepressão daí como prédios contendo grande fachadas de vidros como shopping centers e prédios comerciais.

Tabela 7.11: Estimativas considerando a distância de segurança com talude

#### 7.7 O ACIDENTE DE TOLOUSE EM 2001

No dia 21 de Setembro de 2001 ocorreu na cidade de Tolouse, França, uma grande explosão numa fábrica de fertilizantes (AZF – Azote de France) à base de nitrato de amônio. Na explosão faleceram 29 pessoas e ficaram feridas cerca de 2500, sendo 30 severamente. A investigação determinou que havia de 200 a 300 tons de fertilizante e que a explosão foi equivalente a uma carga de 30 a 40 ton de TNT.

A cratera gerada teve dimensões entre 50 e 60 metros de diâmetro e 7 de profundidade. A quebra de vidraças ocorreu até 3 km de distância, mas a fragmentação de janelas ocorreu numa faixa de 1 a 1,5 km de distância em apartamentos e residências. Os prejuízos foram estimados em 2,3 bilhões de Euros.

Acidentes com nitrato de amônio são raros e improváveis. Por isso a fabrica tinha licença para estocar até 500 ton de fertilizante mesmo havendo bairros residenciais em suas adjacências.

Muitos dos feridos estavam próximos às janelas em apartamentos ou residências. Como já se viu, a fragmentação de janelas envolve tanto a quebra como o arremesso de vidro, representando alto risco de laceração, enquanto que a quebra de janelas representa um risco baixo de laceração. Dividindo-se a distância de fragmentação de janelas pela raiz cúbica da carga ter-se-á 40 m/kg<sup>1/3</sup>. Para o caso de quebra de janelas ter-se-á 80 m/kg<sup>1/3</sup>.

Deste modo, verifica-se que no acidente de Toluose a adoção de uma distância de segurança de 44 m/kg<sup>1/3</sup>, protegeria a maior parte da população ferida pela fragmentação de vidros.

Já a adoção de uma distância de 60 m/kg<sup>1/3</sup> para hospitais, creches e asilos, protegeria esta população da fragmentação de vidraças, situando a meio termo entre a fragmentação e a quebra de vidraças.

Este acidente mostra que num caso real a adoção de distâncias menores que 44 m/kg<sup>1/3</sup> contribui enormemente para ocorrência de vítimas e elevado prejuízo financeiro.

## 7.8 SEPARAÇÃO DA MASSA DE EXPLOSIVOS EM COMPARTIMENTOS

Como se vê o critério de severidade de risco está associado a uma relação denominada de distância escalada, que é a relação entre distância e a raiz cúbica da massa de explosivo. Por distância entende-se o espaço compreendido entre o local que contém explosivo e um tipo de estabelecimento em questão.

Para os diversos estabelecimentos foram propostas distâncias escaladas de segurança considerando o tipo de público envolvido, sendo que foi considerado ainda um fator de atenuação dado a presença de taludes ou barricadas, conforme mostrado na tabela 7.12:

Distância escalada Sem Talude m/kg <sup>1/3</sup>	Distância escalada Com talude ( m/kg <sup>1/3</sup> )	Estabelecimento
22	18	Residências
44	32	Clubes, igrejas, cinemas, escolas
60	41	Hospitais, creches, azilos, Shopping Centers e prédios comerciais

Tabela 7.12: Distâncias escaladas de segurança e os estabelecimentos relacionados.

No caso de uso de taludes as distâncias brasileiras se iniciam com 16,50 m/kg<sup>1/3</sup> reduzindo-se até atingir 6,81 m/kg<sup>1/3</sup>, sendo que de 9.081 kg até 79.450 kg a distância é fixada em 610 m (sem talude) e 305 m (com talude), no limite, com 113.500 kg a distância é de 660 m (sem talude) e 330 m (com talude).

Desta forma, a maior parte dos paióis utiliza distâncias variando de 610 m a 660 m (sem talude) e 305 m a 330 m com talude.

Considerando a distância de 305 m e as distâncias escaladas estimadas para os casos de talude apresentadas na tabela 7.12, pode-se estimar a massa de explosivo referente a distância em questão como mostrado na tabela 7.13.

Tabela 7.13: Massas de explosivo	compatíveis co	om as diversas	distâncias	escalada
referenciadas a 3	305 metros de d	listância .		

Distância Escalada Com talude m/kg <sup>1/3</sup>	Distância com talude m	Massa de explosivo kg
18	305	4.865
32	305	866
41	305	412

Com base nestes valores, pode-se propor separação da massa de explosivo estocada em compartimentos protegidos contra detonação por simpatia, ou seja, de modo que a explosão de um compartimento não cause a explosão de outro.

Assim, por exemplo, uma massa de 20.000 kg poderia ser estocada em compartimentos de 5.000 kg visando manter uma distância de segurança escalada próxima a 18 m/kg<sup>1/3</sup>.

Ocorre que para satisfazer distâncias escaladas de segurança maiores o número de compartimentos aumenta significativamente. No caso de 20.000 kg, precisaríamos de 4 compartimentos para satisfazer 18 m/kg<sup>1/3</sup>, 23 para satisfazer 32 m/kg<sup>1/3</sup> e 49 para 41 m/kg<sup>1/3</sup>. Nestes casos o número de compartimentos inviabiliza uma solução.

Contudo, se considerarmos a massa em cada compartimento fixada em 5.000 kg, teremos como distâncias de segurança 550 metros para 32 m/kg<sup>1/3</sup> e 700 metros para 41 m/kg<sup>1/3</sup>.

O problema da compartimentalização deve ser estudado então considerando:

 1-) Os tipos de estabelecimentos sujeitos aos efeitos de uma explosão acidental. 2-) A distância disponível existente entre os compartimentos e os estabelecimentos.

Para realizar o processo de separar em compartimentos a massa de explosivos é recomendável adotar alguns princípios Weerheijm (2000)

- A distância entre o centro de massa da carga explosiva e o centro de massa da barreira ou talude deve ser de 8,5 metros para evitar detonação por simpatia.
- 2. A barreira ou talude deve ser feito de terra ensacada, para evitar arremesso de material com penetração no compartimento adjacente.
- 3. A barreira deve ter no mínimo 2 metros de largura.
- 4. A altura deve ser maior do que do container em 20 cm.

Um desenho esquemático é mostrado na figura 7.14:





Outras medidas podem ser tomadas a fim de reduzir a severidade dos danos decorrentes de uma eventual explosão:

I-)Fornecer vidraças mais resistentes ou incentivar o uso de filme plástico de proteção para as vidraças.

 II-) Construção de paios subterrâneos, o que é uma tendência em países com dificuldades de espaço.

# Capítulo 8

# Efeitos Psicológicos e de Ruído

#### 8.1 INTRODUÇÃO

Como vimos anteriormente, para distâncias escalada acima de 22 m/kg<sup>1/3</sup>, o risco provável de ferimentos e fatalidade está associado à quebra de vidraças. Foi devido ao risco de fragmentos de vidros que países como Noruega, Suíça e Dinamarca adotaram distâncias escaladas de 44 m/kg<sup>1/3</sup> para estabelecimentos diferentes de residências (Sigbjorn, 2002).

Existe um risco associado à grandes catástrofes oriundo do efeito do pânico gerado pelo evento.

Em locais de entrada restrita como teatros, cinemas entre outros, a tentativa de muita gente de deixar o local simultaneamente costuma gerar feridos e vitimas fatais por pisoteamento.

No caso de cardíacos, o barulho da explosão associado aos pequenos danos pode gerar uma condição de estresse que resulte em ataque cardíaco.

Após uma explosão existe sempre a possibilidade de haver outra. Esta possibilidade costuma fazer com que as pessoas se afastem das proximidades do local do acidente após a primeira explosão.

Na explosão que ocorreu na cidade de Lorena na empresa ORICA em 2004, por exemplo, ocorreram duas explosões com intervalo de minutos, sendo que a segunda causou a quebra de vidraças no Banco do Brasil situada a menos de 2 quilômetros de distância. Quando isto ocorreu, os clientes saíram correndo do banco em pânico. Na ocasião, alguns clientes narraram que tiveram a sensação de que o prédio estava caindo.

Em condições de pânico Jeffries (1997) previu para locais abertos uma probabilidade de feridos de 0,1% e de mortos de 1/10000.

Devido à dificuldade de se mensurar o efeito psicológico e suas conseqüências, em paises como a Noruega existe o emprego do conceito de uma função matemática conhecida como fator de rejeição, que estima o impacto da notícia de um acidente na opinião publica Sigbjorn (2002).

O ruído interno em estabelecimentos comerciais e residências pode ser estimado através da equação 8.1 proposta por Shomer (1995) para relacionar o ruído externo de explosões com o ruído no interior de imóveis. A equação é válida tanto para casas construídas com tijolos como imóveis construídos com madeira. Shomer considerou em seus experimentos imóveis com o interior mobiliado.

$$RuidoInterno(dB) = 0,362(RuidoExterno(dB)) + 80,3$$
(8.1)

Considerando a equação de Ezparza (2000) para prever o valor de ruído fora de residências e a equação proposta por Shomer (1995) para o ambiente interno pode-se montar a Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Relação	o entre distancia	escalada e ruido
Distância	Ruído externo	Ruído interno
escalada m/kg <sup>1/3</sup>	dB	dB
10,0	185,3	147,4
12,5	182,4	146,3
15,0	179,9	145,4
17,5	177,9	144,7
20,0	176,1	144,0
22,50	174,5	143,5
25,0	173,1	143,0
27,5	171,8	142,5
30,0	170,7	142,1
32,5	169,6	141,7
35,0	168,6	141,3
37,5	167,7	141,0
40,0	166,8	140,7
42,5	166,0	140,4
45,0	165,2	140,1
50,0	163,8	139,6
55,0	162,6	139,1
60.0	161.4	138.7

Ezparza (2000) propôs a tabela 8.2 para relacionar a probabilidade de reclamações com o nível de ruído.

Pico de Ruído dB	Probabilidade de reclamações
0-110	Baixa
110-125	Moderada
125-130	Alta
130-140	Alta com possibilidade de reclamações
>140	Alta com possibilidade de pequenos danos

Tabela 8.2: Pico de Ruído e probabilidade de reclamação.

Baseado nestas características montou-se a tabela a seguir onde alguns cenários são discutidos para outros tipos de residência que não a familiar, como asilos, creches, shopping centers, colégios, clubes, locais onde há concentração de população e locais onde há maior predisposição aos efeitos adversos de uma explosão.

Tabela 8.3: Efeitos estimados para pessoal em estabelecimentos situados dentro da distância escalada de 22 m/kg<sup>1/3</sup>.

Tipo de	Efeitos estimados para estabelecimentos situados
estabelecimento	na distância de segurança 22 m/kg <sup>1/3</sup>
Colégios	Apresentam atividades ao ar livre e no interior de edificações, pessoal ao ar livre estará sujeito a perda temporária de audição, o pessoal que estiver no interior de edificações estará sujeito a ferimentos decorrente da quebra de janelas. O pânico pode ser fator de maiores causas de ferimentos e destruição de patrimônio. Os professores terão dificuldade de organizar e acalmar o grande número de crianças e jovens diante da situação de pânico. Existirá a dificuldade de evacuar o local de forma organizada devido ao grande número de pais que estarão desesperados para retirar seus filhos.
Clubes	Apresentam atividades ao ar livre e no interior de edificações, o pessoal ao ar livre estará sujeito a perda temporária de audição, o pessoal que estiver no interior de edificações estará sujeito a ferimentos decorrente da quebra de janelas, o pânico pode ser fator de maiores causas de ferimentos e destruição de patrimônio.
Shopping Center	Apresentam janelas maiores e mais sensíveis aos efeitos da onda de sobrepressão, de modo, que é previsto uma quebra maior de vidraças e estruturas leves como gesso. Como o local possui um concentração de pessoal é provável que o ruído em conjunto com a quebra de janelas potencializados pela geração de feridos crie pânico.
Creches	Os bebes e crianças estarão sujeitos a ferimentos por fragmento de vidros que podem ter um efeito muito mais acentuado do que seria previsto em adultos e jovens. Existirá dificuldade de atendimento de crianças sob situação de pânico por parte das pedagogas.
Asilos	Idosos possuem uma resistência imunológica menor, de modo que os ferimentos causados pelos fragmentos de vidraças são potencialmente mais perigosos do que em pessoas jovens, além disso, idosos são mais propensos a doenças cardíacas de modo que é de se esperar que a ocorrência da explosão crie um ambiente psicológico onde ocorra manifestação de doenças cardíacas, necessitando de evacuação imediata para hospitalização.

## Para as demais distâncias escaladas montamos a seguinte tabela:

## Tabela 8.4: Relação entre distância escalada e publico envolvido

Distância	
escalada	Publico indicado para utilização da distância escalada:
11 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a ferimentos que necessitarão de hospitalização, podendo ocorrer fatalidades. Grau elevado de destruição de alvenaria, cerca de 17 % do custo da construção, e elevado risco associado ao pessoat envolvido, 15 % de ferimentos e ~1% de fatalidade. Devido a severidade dos riscos envolvidos, o publico situado nesta área necessitará de treinamento quanto a procedimentos emergenciais e técnicas de primeiros socorros. Esta distância é inapropriada para público externo devido às necessidades de treinamento e severidade de riscos envolvidos.
22 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a 5 % de ferimentos necessitando de atendimento médico e hospitalização, havendo reduzida probabilidade de fatalidade. Existirá necessidade de evacuação de feridos. Para minimizar o número de feridos é importante que nestas áreas não haja locais típicos de concentração de pessoal como clubes, cinemas, escolas entre outros, nem locais onde haja publico de risco como creches e asilos. Bairros estritamente residenciais apresentam características de menor concentração e menor quantidade de público de risco como idosos e crianças e portanto podem estar situados dentro desta distância escalada. Cabe ressaltar que os danos causados serão alvos de processos judiciais cujo valor total envolvido pode causar o fechamento definitivo do negócio.
44 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a 1 % de ferimentos não havendo probabilidade de fatalidade mas grande possibilidade de pânico devido à quebra de janelas e estruturas de gesso. Existirá necessidade de evacuação de feridos e do pessoal em pânico. Devido ao reduzido número de feridos é possível localizar nestas áreas empreendimentos onde haja concentração de pessoal como clubes, igrejas, cinemas, escolas entre outros. Contudo, esta distância é imprópria para creches, hospitais e asilos, bem como para prédios contendo grande fachadas de vidros como shopping centers e prédios comerciais.
60 m/kg <sup>1/3</sup>	Publico sujeito a reduzida probabilidade de ferimento. Ideal para público sujeito a condições especiais como asilos, hospitais e creches e para empreendimentos mais sensíveis aos efeitos das ondas de sobrepressão como prédios contendo grande fachadas de vidros como shopping centers e prédios comerciais.

Para diferentes tipos de publico propôs-se distâncias escaladas específicas. Com intuito de comparar as distâncias propostas com os valores adotados nos diversos países montou-se a Tabela 8.5.

		Tipos de Em	preendimento	
	rodovias	Residências	Clubes, Escolas,	Asilos,
Legislação			Igrejas, cinemas	creches,
				hospitais,
				prédios
				comerciais,
				shopping
				centers
		Distância esc	alada m/kg <sup>1/3</sup>	
Estados Unidos	9,4-11,4	15,6-19	15,6-19	15,6-19
( com e sem barricada)				
Inglaterra	14,8	22,2	22,2	22,2
( com e sem barricada)				
OTAN	14,8	22,2	22,2	22,2
( com e sem barricada)				
Norueguesa	14,8	22,2	44,4	44,4
( com e sem barricada)				
Suíça	14,8	22,2	44,4	44,4
( com e sem barricada)				
França	14,8	22,2	44,4	44,4
( com e sem barricada)				
Brasil	11,1	11,1	11,1	11,1
(com barricada)				
Brasil	22,2	22,2	22,2	22,2
( sem barricada)				
Sugestão	22	22	44	60
( com <u>e sem barricada</u> )				

# Tabela 8.5: Tabela comparativa entre distância escalada adotadas por diversos países.

Com base nesta tabela comparativa cabe os seguintes comentários:

i-) Enquanto a distância de segurança adotada nos Estados Unidos contempla como critério de segurança os danos patrimoniais sofridos pela edificação ( 5 % do custo total de construção) as legislações européias admitem como critério os danos pessoais ( 5 % de feridos).

ii-) Quando se estabeleceu um critério de distância de segurança baseandose no custo total de construção deixou-se de levar em consideração diversos aspectos, como o custo associado a danos em móveis, decorações, eletroeletrônicos entre outros. Reed, na análise do acidente da PEPCON verificou que os danos causados por uma explosão de equivalente de 250 ton TNT em residências situadas além da distância de segurança totalizaram em U\$ 70.000.000,00 em 17.000 processos. Grande parte deste valor se devia a despesas advocatícias e indenização por danos morais, além dos danos esperados em janelas, mobílias entre outros relacionados.

iii-) As distâncias de segurança européias foram baseadas no trabalho **de** Jarret, que estabeleceu critérios com base na análise da destruição de edificações e estatística de feridos e mortos durante a segunda guerra **m**undial. A análise do acidente de 1964 mostrou uma boa relação entre a previsão do trabalho de Jarret e a descrição dos danos observados. Entretanto, esta correspondência deveu-se à semelhança entre o tipo de construção presente no acidente de 1964. Ocorre que desde os anos 60 o surgimento de novos materiais levou ao desenvolvimento de construções mais leves e frágeis, inclusive com maior emprego de vidraças. Um exemplo são os modernos prédios comerciais que apresentam em sua fachada uma grande quantidade de vidraças buscando o aproveitamento da iluminação natural. Para estes tipos de construção espera-se que a destruição sofrida seja mais intensa do que a que seria prevista.

iv-) Considerando edificações na distância escalada 22,2 m/kg<sup>1/3</sup> tem-se pelo critério de Jarret, a categoria de danos Ca que pode ser descrita como:

"Casas que permanecem inabitáveis, mas podem ser razoavelmente reparáveis durante a guerra, a destruição sofrida não compromete a integridade estrutural das paredes, as divisórias de madeira são danificadas, havendo danos nos batentes de portas e janelas, pequena parte da estrutura do telhado comprometida e telhas arrancadas mais de 25 %."

É nesta distância que a maioria das legislações citadas situa a distância de segurança para residências.

v-)A distância escalada de segurança 44,4 m/kg<sup>1/3</sup> é adotada em alguns países quando se deseja um grau de proteção maior para estabelecimentos onde ocorrem reunião de pessoas como clubes, hospitais, creches, asilos entre outros, para esta distância tem-se o critério de categoria de danos D que possui a seguinte descrição:

"Casas requerendo reparos, mas permanecendo habitáveis. Residências nesta categoria apresentam pequenos danos nos telhados, nas telhas, e menor efeito de fragmento nas paredes com quebra de vidros nas janelas sem comprometimento dos batentes. Casas cujas janelas quebradas representarem 10 % do total de janelas não estão incluídas."

vi-) No Brasil são adotados dois tipos de distância de segurança, um com barricada e outro sem barricada, este tipo de procedimento foi abandonado nos anos 70 devido a comprovação da ineficiência do uso de barricada.

vii-) Ao permitir a redução da distância de segurança à metade pelo uso da barricada, as distâncias de segurança brasileiras se tornaram as menores dentre os países considerados. Nesta distância espera-se 15 % de feridos e cerca de 1% de fatalidade, como já foi visto tal condição é inapropriada para residências e estabelecimentos como hospitais, creches, escolas, asilos, clubes, igrejas, cinemas, etc.

viii-) A distância a rodovias deriva de idéia originária do começo do século XX e citada por Assheton:

"... Após cuidadosas considerações foi concluído que distâncias razoavelmente seguras para ferrovias seriam obtidas tomando-se 60% do valor das distâncias de segurança para edificações habitadas, sendo as razões para esta conclusão as seguintes":

A menor altura e menor área dos carros da ferrovia expostos para resistir a concussão quando comparados com as edificações.

O fato de que enquanto as edificações são estacionárias e sujeitas a riscos de forma constante, a presença do trem é somente temporária."

148

Os aspectos psicológicos referentes a uma explosão são difíceis de se mensurar, contudo existe uma função denominada de fator de aversão que visa relacionar o impacto de uma notícia na opinião pública.

Na Noruega este fator é dado pela seguinte função:

 $\varphi = 2^{(FN_5)}$ 

Onde:

φ= fator de aversão.

FN= número de fatalidades (Fatality Number)

FN varia de 1 a 25, pois, considera-se que para número de mortos acima de 25 a reação da sociedade atinja seu valor máximo, não se intensificando. Desta forma,  $\varphi$  varia de 1 a 32.

De certa forma o fator de aversão é limitado pois as fatalidades mais freqüentes estão associadas ao pessoal envolvido no manuseio e fabricação de explosivos.

Cabe a seguinte questão: O que causa mais repúdio?

A notícia de que "houve uma explosão onde 5 trabalhadores morreram", ou a notícia de que "houve uma explosão e numa escola adjacente 5 crianças se feriram".

Geralmente, os questionados informam que a idéia de crianças feridas é mais repugnante do que funcionários mortos. O motivo é que as crianças são vitimas inocentes de um acidente, enquanto que os funcionários são pessoas preparadas para função e que estavam cientes do grau de risco da atividade exercida.

Deste modo ao limitar a reação pública ao número de mortos deixou-se de considerar o impacto do número de vítimas feridas externas ao empreendimento.

Como a relação entre o número de vítimas feridas e falecidas varia geralmente de 10:1 a legislação norueguesa que considerava o risco individual em 10<sup>-4</sup>/ano adotou 10<sup>-5</sup>/ano, tornando o critério de risco individual mais severo para os indivíduos externos ao empreendimento.

\_\_\_\_\_

Deste modo existe uma tendência em paises como a Noruega de adoção de critérios mais rígidos para distâncias de segurança tendo em vista tanto a reação da opinião pública quanto a possibilidade de vítimas.

# Capítulo 9

# Estudo de Caso 3 - Acidente envolvendo a explosão de navio contendo material inflamável

#### 9.1 INTROĐUÇÃO

Neste capítulo desenvolveu-se uma análise de um acidente de um navio atracado no porto.

Procurou-se fornecer uma base matemática de cálculo para elucidar os fatos observados através de modelos, de modo a descrever o desenvolvimento de atmosferas explosivas de vapores, no caso metanol, abordando as condições referentes às propriedades termodinâmicas de combustão e de explosão, bem como os aspectos cinéticos de desenvolvimento da explosão.

Para tanto, inicialmente serão apresentadas as notas referentes ao significado dos termos técnicos utilizados. Em seguida, discutir-se-á os aspectos referentes à evaporação e difusão de vapores de metanol no ar ambiente tanto em locais fechados como em locais abertos. Dando prosseguimento foi verificada as condições termodinâmicas de pressão e temperatura para combustão de metanol. Conseqüentemente, verificar-se-á a influência da concentração volumétrica de metanol com relação a sensibilidade de ignição. Neste caso, avaliou-se a energia mínima de ignição e temperatura de autoignição.

Com base nos aspectos discutidos, apresenta-se um desenvolvimento para esclarecer o processo interno de combustão num certo tanque. Deste modo, analisou-se o processo de ruptura do tanque e identificou-se o processo cinético de combustão interna, obtendo informações sobre o processo de ignição. Com base nisto e tendo conhecimento dos equipamentos internos do tanque foi deduzida a causa da explosão.

## 9.2. ASPECTOS DE EVAPORAÇÃO E DIFUSÃO DOS VAPORES DE METANOL NO AR AMBIENTE

#### 9.2.1 Introdução

Entre a interface de qualquer líquido e uma atmosfera gasosa observa-se a presença de vapores do líquido, pois, as moléculas do mesmo na interface liquidogás exercem uma pressão sobre a fase gasosa de modo a se difundir para dentro da fase gasosa sob a forma de vapor. Simultaneamente as moléculas de liquido vaporizado se liquefazem no contato com a interface liquido-gás, buscando a condição de equilíbrio, dependente somente da temperatura.

Quanto maior a temperatura, maior a pressão exercida pelas moléculas de líquido para evaporar e maior será portanto o que foi denominado de pressão de vapor. Para líquidos inflamáveis, existe uma temperatura mínima na qual se atinge pressão de vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar, denominada de "flash-point".

Todo material combustível possui uma faixa de concentração na quais seus vapores formam uma mistura homogênea com o oxidante gasoso de modo que há propagação de chama. Os limites desta faixa são denominados de limites de inflamabilidade.

Assim a formação de atmosferas explosivas está relacionada no caso de líquidos inflamáveis à dispersão de seus vapores em meios gasosos oxidantes. Quanto maior a pressão de vapor maior a dispersão dos seus vapores. No caso de materiais estocados pressurizados tais como gases ou vapores liquefeitos a dispersão por meio de vazamentos está associada ao processo de expansão dos mesmos.

#### 9.2.2) Desenvolvimento do Modelo de Evaporação de Metanol

Para obter o perfil de concentração dos vapores de metanol no ar com o tempo, visando verificar as condições de formação de nuvens inflamáveis, utilizou-se o modelo proposto por Bird (1990) para evaporação em condições onde não existe a ação de ventos ou dispersão lateral, conforme é mostrado à seguir:

Parâmetros :

$$C = \frac{C_{M}}{C_{Mo}}$$
(9.1(a))

$$S = \frac{s}{\sqrt{4D_{M}t}}$$
(9.1(b))

Onde :

 $c_{Mo}$  = Concentraç ão inicial de metanol  $c_{M}$  = Concentraç ão de metanol s = altura (m) t = tempo (s)

$$D_{M} = Difusivida de \frac{m^2}{s}$$

Modelos de previsão de concentração :

$$C = \frac{1 - \operatorname{erf}(S - \varphi^{i})}{1 + \operatorname{erf}(\varphi^{i})}$$
(9.2(a))  
Sendo  $\varphi^{i} = \varphi \frac{\sqrt{\pi}}{c_{Mo}}$ (9.2(b))

Onde  $\varphi$ é dado pela solução da seguinte equação :

$$c_{Mo} = \frac{1}{1 + \left[\sqrt{\pi} (1 + \operatorname{erf}(\varphi))\varphi \exp(\varphi^2)\right]^{-1}}$$
(9.2(c))

9.2.3 Estimativa de Parâmetros:

Estimativa da difusividade do metanol no ar (Reid, 1988).

$$D_{AB} = \frac{0.00266 T^{\frac{3}{2}}}{P.M_{AB}^{\frac{1}{2}}\sigma_{AB}^{2}\Omega_{D}}$$
(9.3(a))

UNICAMP
BIBLICATOR CONTRADA
Carational Content
DESENVOLVORINTO DO CODOO

1

onde:

D<sub>AB</sub> =coeficiente de difusão, cm<sup>2</sup>/s

T = Temperatura em K

P = Pressão, em bar

k = Constante de Boltzmann 1,3805 10<sup>-23</sup> J/K

$$M_{AB} = Peso Molecular médio = \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}\right)^{-1}$$
(9.3(b))

$$\sigma_{AB} = comprimento característico, A$$

 $.\Omega_{D} = integral de colisão de difusão, admensional$ 

$$\Omega_{\rm D} = \frac{1,06036}{\left({\rm T}^{*}\right)^{0.15610}} + \frac{0,19300}{\exp(0,47635\,{\rm T}^{*})} + \frac{1,03587}{\exp(1,52996\,{\rm T}^{*})} + \frac{1,76474}{\exp(3,89411\,{\rm T}^{*})} \tag{9.3(c)}$$

$$T^* = \frac{k \cdot T}{\epsilon_{AB}}$$
(9.3(d))

 $\epsilon_{\scriptscriptstyle AB}$  = parâmetro de energia caracteristica para uma interação A – B

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{AB} = \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{A}, \boldsymbol{\varepsilon}_{B}\right)^{1/2} \tag{9.3(e)}$$

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}$$
(9.3(f))

$$D_{AB} = \left( \begin{array}{c} n_A \\ D_A \end{array} + \begin{array}{c} n_B \\ D_B \end{array} \right)^{-1}$$
(9.3(g))

 $n_i = fração molar do componente i$ 

Dados utilizados são apresentados na tabela 9.1.

	adee para eennanta aa	
Componente	$\varepsilon_{l_{1}}$	σ
Motonoi	<u> </u>	2.606
Wetanoi	401,0	3,626
<u>U2</u>	106,7	3,467
N <sub>2</sub>	71,4	3,798

Tabela 9.1 Dados para estimativa da difusividade

Exemplos de coeficientes de difusividade são apresentados na tabela 9.2.

	Coeficiente	Coeficiente de Difusividade do metanol cm <sup>2</sup> /s				
Meio	15 °C	20 °C	25 °C			
O <sub>2</sub>	0,2007	0,2075	0,2144			
N <sub>2</sub>	0,2065	0,2133	0,2203			
Ar ambiente	0,2052	0,2121	0,2190			

Tabela 9.2 Coeficiente de difusividade do metanol

Utilizando os dados de difusividade no modelo proposto por Bird (1990) e tendo em vista que a faixa de inflamabilidade esta compreendida entre 6 e 36 % em volume, considerando ainda, que na interface a concentração está vinculada à pressão de evaporação, então a altura da coluna inflamável é estimada com base no limite inferior de inflamabilidade, que é de 6% em volume para o metanol. Assim, tem-se a tabela 9.3.

Temperatura °C	Difusividade cm <sup>2</sup> /s	Pressão de vapor ( bar )	C (*)	S
18	0,2093	0,1159	51,79%	1,0776
20	0,2121	0,1292	46,45%	1,1709
22	0,2149	0,1438	41,73%	1,2563
25	0,2190	0,1683	35,64%	1,3732

Tabela 9.3 Efeito da temperatura no coeficiente de difusividade

Obs: (\*) concentração mínima de 6 %.

Com base nestes resultados montou-se o gráfico da figura 9.1 onde se verifica a altura da coluna inflamável, considerando aspectos de temperatura e tempo.



Figura 9.1: Gráfico de altura de faixa de explosividade em função da temperatura e do tempo

Como pode ser verificado, a dispersão de vapores de metanol é lenta pois depende principalmente de fenômenos difusivos.

No caso de gases comprimidos a própria descompressão gera movimento e a turbulência necessários para gerar rapidamente uma mistura inflamável. Deste modo, devido ao longo tempo necessário para a dispersão dos vapores, que os líquidos infamáveis tendem a formar bolsões explosivos em locais de ventilação extremamente baixa como no interior de equipamentos e tanques de estocagem.

#### 9.2.4 Modelo de Evaporação no Estado Estacionário Considerando Dispersão pelo Efeito de Vento

Continuando o estudo da formação de ambientes explosivos por efeito da evaporação de metanol, considerou-se o caso da dispersão de vapores de metanol no ar atmosférico sob efeito da ação de vento, conforme a figura 9.2. Nesta situação, foi suposto que o metanol está derramado no convés do navio e lateralmente existe a ação de ventos.



Figura 9.2: Ilustração da camada de vapor.

Esta situação tem sido amplamente estudada sendo denominada de "Limiting boundary layer for mass transfer" - camada limite de transferência de massa. O problema pode ser descrito matematicamente por um sistema de equações diferenciais, cuja solução pode ser descrita a seguir, Bird (1990).

Solução das Equações de camada limite envolvendo transferenciade massa :

$$\frac{\mathbf{c}_{M0} - \mathbf{c}_{M}}{\mathbf{c}_{M} - \mathbf{0}} = \frac{3}{2} \left( \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{\delta}_{c}} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{\delta}_{c}} \right)^{3}$$
(9.4(a))

Onde:

 $\delta_c$  = espessura da camada limite mássica

 $h = altura da concentração c_M$ 

Sendo:

$$\delta_{c} = \frac{\delta}{Sc^{\frac{1}{3}}}$$
(9.4(b))

Onde :

 $\delta$  = espessura da camada limite cinética

Sc = número de Schimidt, compara ação das forças viscosas com a difusão Sendo :

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4.64}{\text{Re}_{x}^{1/2}}$$
 (9.4(c))

Onde:

Rex = número de Reynolds da camada limite

x = distância do início da camada limite

## 9.2.4.1 Estimativa do Número de Schimidt

Estimativa da viscosidade do vapor de metanol e do ar, (Reid, 1988)

$$\mu_{\rm r} = 131, 3 \frac{\mu}{\left(V_{\rm c} T_{\rm c}\right)^{0.5}} \tag{9.5(a)}$$

$$F_{c} = 1 - 0,2756\omega + 0,059035\mu_{r}^{4} + \kappa$$
 (9.5(b))

$$\eta = 40,785 \frac{F_{c}(MT)^{1/2}}{V_{c}^{2/3}\Omega_{D}}$$
(9.5(c))

 $\eta = viscosidade, \ \mu P$ 

 $\mu$  = momento dipolar em debyes

- $\mu_r$  = momento dipolar admensional definido na eq.9.5(a)
- M = Peso molecular
- $F_c$  = fator de forma e polaridade
- $\omega = fator acentrico$
- κ = fator de correção polar
- T = temperatura, K

$$V_c = volume crítico, cm^3/mol$$

$$T^{*} = \frac{k.T}{\epsilon_{AB}}$$
  

$$\Omega_{v} = (1,16145(T^{*})^{0.14874}) + 0.52487[exp(-0.77320T^{*})]$$
  

$$+ 2,16178[exp(-2,43787T^{*})]$$
(9.5(d))

Dados para estimativa de viscosidade são apresentados na tabela 9.4.

1 400.0	Tabela 0.4 Dados para estimativa da viscosidade, (Neid, 1900)					
Componente	μ	T <sub>c</sub> (K)	Vc (cm³/g)	ω	k	
O <sub>2</sub>	0,00	154,6	73,4	0,025	0,000	
N <sub>2</sub>	0,00	126,2	89,8	0,039	0,000	
metanol	1,700	512,6	118	0,556	0,215	

.

Tabela	9.4 Dados	s para	estima	tiva da	a visc	osidade,	(Reid, 198	38)
								-

Valores estimados para componentes puros são apresentados na tabela 9.5.

.

Componente		Viscosidade $\mu P$	<u> </u>
	15 °C	20 °C	25 °C
O <sub>2</sub>	157,18	158,53	159,86
N <sub>2</sub>	127,44	128,44	129,42
metanol	100,06	101,57	103,07

Tobolo 0.5	Vlariação	40	viscosidada	0000 0	a tam	nonation
	vanaçau	ua	VISCUSIUAUE			peratura.

Para misturas gasosa tem-se, (Reid, 1988):

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}}$$

Onde :

$$\varphi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{i}}{\eta_{j}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_{i}}{M_{j}}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^{2}}{\left[8 \cdot \left(1 + \frac{M_{i}}{M_{j}}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{2}}$$
(9.6(b))

A variação da viscosidade com a concentração pode ser apresentada então conforme a tabela 9.6.

	Temperatura				
Teor de Metanol	15°C	20°C	25 °C		
v/v %		Viscosidade µ	P		
1,0%	132,28	133,35	134,40		
2,0%	131,85	132,93	133,99		
3,0%	131,42	132,51	133,58		
4,0%	131,00	132,10	133,17		
5,0%	130,58	131,68	132,77		
6,0%	130, <u>1</u> 6	131,27	132,37		
7,0%	129,75	130,87	131,97		
8,0%	129,33	130,46	131,57		
9,0%	128,92	130,06	131,18		
10,0%	128,52	129,66	130,79		
11,0%	128,11	129,26	130,40		
12,0%	127,71	128,87	<b>130,</b> 01		
13,0%	127,31	128,48	129,62		
14,0%	126,91	128,09	129,24		
15,0%	126,52	127,70	128,86		

Tabela 9.6 Variação da viscosidade com a concentração

(9.6(a))

#### 9.2.4.2 Estimativa da Densidade da Mistura Gasosa

$$M_{m} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{y_{i}}{M_{i}}\right)^{-1}$$

$$\rho = \frac{PM_{m}}{RT}$$
(9.6(a))
(9.6(b))

Onde:

M = Massa molecular do componente i

y<sub>i</sub> = fração molar do componente i

P = Pressão em bar

T = Temperatura em K

R = constante universal dos gases 83,145 bar.cm<sup>3</sup>/(mol.K)

A variação da densidade coma concentração é apresentada na tabela 9.7.

	Temperatura			
Teor de Metanol	15°C	20 °C	25 °C	
%		Densidade g/cm	3	
1,0%	0,00120	0,00118	0,00116	
2,0%	0,00120	0,00118	0,00116	
3,0%	0,00120	0,00118	0,00116	
4,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
5,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
6,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
7,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
8,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
9,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
10,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
11,0%	0,00121	0,00119	0,00117	
12,0%	0,00122	0,00119	0,00117	
13,0%	0,00122	0,00120	0.00118	
14,0%	0,00122	0,00120	0,00118	
15,0%	0,00122	0,00120	0,00118	

Tabela 9.7 Variação da densidade com a concentração

#### 9.2.4.3 Cálculo do Número de Schimidt

$$Sc = \frac{v}{D}$$
(9.7(a))  
 $v = coeficiente cinemático de viscosidade$   
 $D = coeficiente de difusividade$   
 $v = \frac{\eta}{\rho}$ 
(9.7(b))

Os valores para o número de Schimidt considerando os efeitos de concentração e temperatura são apresentados na tabela 9.8.

 Tabela 9.8 Variação do Número de Schimidt com a concentração.

 Temperatura

	Temperatura		
Teor de Metanol	15°C	20 °C	25 °C
v/v %	N	úmero de Schim	idt
1,0%	0,5362	0,5321	0,5282
2,0%	0,5339	0,5299	0,5260
3,0%	0,5317	0,5277	0,5239
4,0%	0,5294	0,5255	0,5218
5,0%	0,5272	0,5234	0,5196
6,0%	0,5250	0,5212	0,5175
7,0%	0,5227	0,5191	0,5155
8,0%	0,5205	0,5169	0,5134
9,0%	0,5184	0,5148	0,5113
10,0%	0,5162	0,5127	0,5093
11,0%	0,5140	0,5106	0,5072
12,0%	0,5119	0,5085	0,5052
13.0%	0.5098	0.5065	0.5032

#### 9.2.5 Resultados e Discussão

Pelos gráficos das figuras 9.3 e 9.4 pode-se verificar que a presença de ventilação em locais abertos como o convés do navio seria suficiente para dispersar os vapores de metanol de modo que a altura da camada de vapor inflamável não excedesse a 20 cm. Cabe ressaltar que para este caso foi considerado um vazamento de metanol capaz de encharcar todo o convés.

161



Figura 9.3: Altura da coluna de vapor inflamável considerando velocidade do vento de 1 m/s, para temperaturas de 15 °C, 20 °C e 25 °C.



Figura 9.4: Altura da coluna de vapor inflamável considerando velocidade do vento de 1 m/s, 0,5 m/s e 2 m/s, para temperatura de 20  $^{\circ}C$ .

#### 9.2.6 Conclusão do Item

Através de modelos de transferência de massa baseados em processos difusivos calculou-se o tempo necessário para formação de altura de coluna de vapores inflamáveis dentro de ambientes fechados e ambientes ventilados. Como o processo é de cinética lenta, estimou-se com modelos matemáticos, que não havia possibilidade de existir sobre o convés uma nuvem com altura superior a 20 cm ainda que o mesmo se encontrasse encharcado de metanol.

### 9.3 ASPECTOS TERMODINÂMICOS ASSOCIADOS À REAÇÃO DE COMBUSTÃO DE METANOL: PRODUTOS, TEMPERATURA E PRESSÃO.

#### 9.3.1 Introdução Sobre os Aspectos Termodinâmicos

Como foi visto anteriormente, a dispersão dos vapores de metanol nas condições ambientes é de cinética lenta, de modo que a acumulação de vapores para gerar um grande volume de mistura gasosa requer condições de ventilação brandas, sendo que mesmo brisas na faixa de 0,5 m/s são capazes rapidamente de dispersar uma mistura gasosa em ambientes abertos.

A formação de atmosferas explosivas é favorecida para o caso de ambientes fechados como no interior de tanques.

Na tabela 9.9 são apresentados os limites de inflamabilidade de diversos compostos. Entre parênteses são mostrados a concentração de queima estequiométrica. A tabela também apresenta dados referentes a temperatura de auto ignição, ou seja, a temperatura em que ocorre combustão espontânea.

Gás ou vapor	Limite de inflamabilidade Vol %	Temperatura de auto-ignição ( °C )
Metano	5,0-(9,5)-15,0	595
Etano	3,0 -(5,6)-15,5	515
Propano	2,1-(4,0)-9,5	470
Eteno	2,8-(6,5)-28,6	425
Butano	1,3-(3,1)-8,5	365
Propeno	2,0-(4,4)-11,0	455
_Hidrogênio	4,0-(29,5)-75,6	560
Ciclohexano	1,2-(2,3)-8,3	260
Metanol	6,0-(12,4)-36,0	470

#### Tabela 9.9: Faixa de Inflamabilidade, concentração estequiométrica volumétrica e Temperatura de Auto-ignição Bosh (1997).

## 9.3.2 Diagrama de Inflamabilidade.

Como pode ser constatado o metanol apresenta uma faixa comparativamente larga de inflamabilidade. Assim, pode-se dizer que o metanol está entre os compostos que requerem menor quantidade de oxigênio para realizar de modo sustentável uma reação de oxidação.

Na chama de metanol não há geração de "fuligem" e os produtos de combustão dependem da concentração dos vapores de metanol.

Entre 6,0%, limite inferior de inflamabilidade e 12,4 % os produtos são basicamente vapor d'agua e gás carbônico. Já entre 12,4 % e 17,4 % ocorre a formação de monóxido de carbono, a partir de 17,4 % não há mais formação de dióxido de carbono, havendo formação de formaldeído e entre 29,8% e 36 % ocorre a formação de formaldeído e vapor d'agua. Tal descrição é ilustrada a seguir:
- 36,0% Limite Superior de Inflamabilidade
- 29,8%Reação química do tipo $CH_3OH + \frac{1}{2}.O_2 \rightarrow CH_2O + H_2O$ 17,4%Reação química do tipo $CH_3OH + O_2 \rightarrow CO + 2.H_2O$ 12,4%Reação química do tipo $CH_3OH + \frac{3}{2}.O_2 \rightarrow CO_2 + 2.H_2O$
- 6,00% Limite Inferior de Inflamabilidade

O Diagrama de inflamabilidade do metanol é apresentado na figura 9.5. A partir de 11 °C os vapores produzidos pelo metanol são suficientes para provocar uma ignição com o ar. Com aumento da temperatura aumenta a pressão de vapor. O limite de 36% é atingido próximo de 40 °C. A partir desta temperatura atingiu-se concentrações de vapor na superfície do líquido superiores ao limite superior de inflamabilidade.



Figura 9.5: Diagrama de Inflamabilidade do Metanol

Além desses aspectos o diagrama ilustra também o aumento dos limites de explosão em função da temperatura ambiente. Como pode-se perceber pela inclinação das retas, este aumento é pequeno.

#### 9.3.3 Temperatura de Chama Adiabática

Para estimar a máxima temperatura de queima de uma determinada concentração de metanol no ar assumiu-se as seguintes considerações:

1-) Que os vapores de metanol e o ar formam uma mistura homogênea.

2-) Que o calor gerado pela combustão é absorvido pelos produtos da reação.

 Que o calor gerado não é transferido para o meio ambiente vizinho a mistura metanol ar.

4-) Que além das reações de combustão mencionadas anteriormente, ocorre equilíbrio químico entre as espécies formadas do tipo :

$$CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2$$
; sendo:  $Ka(T) = \frac{[X_{CO}][X_{H2O}]}{[X_{CO_2}][X_{H2}]}$ , (9.8)

onde Xi é a concentração do componente "í"

e Ka é a constante de equilíbrio químico, dependente da temperatura.

Deste modo, pode-se calcular o seguinte gráfico da figura 9.6:



Figura 9.6 : Temperatura de Queima Adiabática.

Deste gráfico pode-se observar o seguinte:

1-) A temperatura de combustão apresenta os menores valores nos limites da região de combustão, que são 6 % e 36 %.

2-) A temperatura máxima de combustão está na concentração de combustão completa que é de 12,4%.

3-) Entre 10% e 16% existe uma região onde a temperatura de combustão possui valores maiores do que 80% da temperatura de queima estequiométrica.
 Para esta região apresentou-se os dados tabelados a na tabela 9.10.

Tabela 9.10: Temperatura Adiabática de Combustão Calculada e Concentração Volumétrica

Concentração de Metanol v/v %	10,0%	11,0%	12,0%	13,0%	14,0%	15,0%	16,0%
Temperatura (°C)	1609	1755	1908	1902	1803	1711	1624

Para o caso de locais fechados e longo período de armazenagem como tanques de estocagem não inertizados, o volume vazio será composto de uma mistura de ar e vapores de metanol. A concentração neste caso pode ser estimada por meio da pressão de vapor de metanol, que é obtida em função da temperatura, conforme a tabela 9.11:

Temperatura	Concentração
(Celsius)	V/v%
15	9,8%
16	10,4%
17	11,0%
18	11,6%
19	12,2%
20	12,9%
21	13,6%
22	14,4%
23	15,2%
24	16,0%
25	16,8%
26	17,7%

Tabela 9.11 Variação da concentração de metanol com a temperatura

Como pode ser verificado, para concentrações entre 10 e 16 %, a temperatura ambiente oscila entre 15°C e 24°C, sendo que a concentração esteguiométrica encontra-se entre 19°C e 20°C.

9.3.4 Pressão Decorrente da Combustão

A pressão em local confinado depende tanto da temperatura dos produtos de combustão como do número de moles entre reagentes e produtos. O gráfico da figura 9.7 apresenta os resultados calculados para esta condição.



Figura 9.7: Pressão gerada pela combustão adiabática do metanol para diversas concentrações volumétricas.

Deste gráfico pode-se observar o seguinte:

1-) A pressão decorrente da combustão apresenta o menor valor nos limites da região de combustão, que são 6 % e 36 % em volume.

 2-) A pressão máxima de combustão está na concentração próxima de 13%, que está acima da concentração estequiométrica.

3-) Considerando as concentrações entre 10% e 16% apresentou-se os dados da tabela 9.12:

Tabela 9.12: Pressão gerada calculada pela combustão adiabática do metanol para diversas concentrações volumétricas

Concentração de Metanol v/v %	10,0%	11,0%	12,0%	13,0%	14,0%	15,0%	16,0%
Pressão (bar)	6,627	7,176	7,753	7,846	7,643	7,451	7,264

Ao contrário da temperatura, os valores de pressão são bastante próximos quando considerou-se a faixa compreendida entre 11 % e 16 %. Em locais fechados estas concentrações estão associadas a faixa de temperatura de 17°C e 24°C. Assim, em condições de temperatura ambiente, considerando os vapores liberados em local confinado, caso ocorra uma combustão, a temperatura dos produtos será próxima da temperatura máxima de combustão e com isso atingirá um valor de pressão interna próximo do máximo.

#### 9.3.5 Conclusão dos Aspectos Termodinâmicos.

Foram apresentados o diagrama de Inflamabilidade do Metanol e as curvas referentes a temperatura e pressão geradas em uma combustão adiabática. Com base nestes valores e considerando a variação da temperatura ambiente nas horas que antecederam a explosão, pode-se avaliar que o ambiente interno dos tanques estava propício a geração de elevadas temperaturas e pressões de combustão devido a proximidade das concentrações volumétricas de vapor de metanol com a concentração estequiométrica de queima.

# 9.4 ASPECTOS RELACIONADOS A SENSIBILIDADE DE IGNIÇÃO DO METANOL

# 9.4.1 Introdução Sobre os Aspectos Relacionados

Como já foi visto anteriormente, tanto a temperatura como a pressão gerada na combustão do metanol dependem da composição da mistura metanol – ar . Similarmente, verifica-se que a sensibilidade à ignição seja por temperatura, por atrito ou faíscas elétricas também depende da composição do meio.

# 9.4.2 Relação entre Temperatura de Autoignição e Concentração

Geralmente, observa-se nas referências bibliográficas que a temperatura mínima de ignição do metanol se situa na faixa de 450°C a 470°C. Contudo, este dado é válido para composições próximas da razão estequiométrica.

Na prática, observa-se que próximo aos limites da faixa de inflamabilidade a temperatura necessária para iniciar uma ignição é maior, aproximando-se da temperatura final dos produtos de combustão.

O diagrama da figura 9.8 demonstra este fato, neste diagrama a temperatura dos extremos da faixa de inflamabilidade foi tomada como 600 °C.



Figura 9.8: Relação entre temperatura de Combustão e concentração.

Como pode ser verificado, entre 10% e 20 % a temperatura de ignição possui valores similares, contudo, nos limites da faixa de inflamabilidade a temperatura mínima de ignição apresenta um aumento abrupto em seus valores. Deste modo, pode-se dizer que próximo da concentração estequiométrica a sensibilidade à ignição é maior.

#### 9.4.3 Relação entre Energia Mínima de Ignição e Concentração.

Outro parâmetro de avaliação de sensibilidade é a energia mínima de ignição, ou seja, a energia mínima em que uma carga elétrica, gerada por faísca ou atrito, inicia a combustão em uma atmosfera inflamável.

O gráfico da figura 9.9 ilustra o comportamento para o caso do metanol, considerando que nos extremos a energia é de 10 mJ, Vidal (2004).



Figura 9.9: Energia Mínima de ignição e Concentração de Metanol.

## 9.4.4 Conclusão Sobre Aspectos de Sensibilidade

Verificou-se que dentro da faixa de inflamabilidade existe uma região onde tanto a temperatura mínima de ignição como a energia mínima de ignição apresentam seus menores valores.

Nesta faixa, pode ser dito que existe uma maior sensibilidade de iniciação de ignição. Tal faixa se estabelece entre 10% e 20% de concentração volumétrica, correspondendo em termos de pressão de vapor a temperatura compreendida entre 16°C e 26°C.

Como a temperatura ambiente oscilava entre 19 °C e 21 °C, pode-se concluir que a atmosfera gasosa presente nos tanques possuíam uma sensibilidade elevada à ignição devido a estímulos como atrito, faísca ou superfícies quentes ( acima de 470 °C).

173

#### 9.5.1 Introdução Sobre o Mecanismo de Ruptura

Analisando-se partes recuperadas do navio constatou-se que um dos tanques apresentava rompimentos na antepara longitudinal de modo que a chapa metálica ficou deformada e voltada para dentro do outro bordo, na antepara vertical de modo que a chapa ficou deformada e retorcida para dentro do tanque a ré do mesmo, além disso, ocorreu uma ruptura no convés, de modo que as chapas metálicas ficaram deformadas indicando explosão no sentido daquele tanque boreste para o convés.

Não ocorreu rompimento aparente no fundo do tanque analisado, na antepara entre o mesmo e o tanque avante e entre este e o tanque mais avante.

A análise da deformação das chapas indica claramente uma explosão interna no mesmo tanque mencionado.

Para elucidar a evolução interna da explosão, abordou-se inicialmente o caso de uma explosão gerada por uma fonte de ignição fraca, como faísca, atrito ou aquecimento. Em seguida aplicou-se o método multi-energético, objetivando assim o obter o mecanismo que mais se adequasse com os danos observados.

Desta forma, poder-se-á verificar primeiramente a velocidade de propagação de trinca nas chapas do tanque. Em seguida, a área mínima de ventilação e o tempo necessário para desenvolvimento de pressão dentro do tanque. Com base nisto, poder-se-á propor um modelo para verificar se a cinética de ruptura é suficientemente rápida para criar um alívio e com isso minimizar a destruição do tanque. Se isto ocorrer, será buscado à luz da teoria do método multi energético um mecanismo que justifique uma aceleração da cinética de combustão.

#### 9.5.2 Cinética de Ruptura

As espessuras Obtidas dos planos estruturais do Navio foram:

## Convés Principal:

a. Na região dos tanques centrais:	9,5 mm
b. Na região dos tanques laterais:	18,0 e 20,0 mm - Tanques 5 BB / BE

## Anteparas Longitudinais:

a.Linha de centro: 11.0, 13.0 e 10.5 mm do convés principal para o fundo do tanque.

b. Laterais: 8.0, 8.0, 8.0, e 9.0 mm a respectivamente 2.350, 2.600,
2.600 e 2.700 mm medidos do convés principal para o fundo do tanque.

## Anteparas Transversais:

a. Tanques 2/3 e 7/8: 8.0, 8.5, 10.5, 12.5, e 15.0 mm medidos do convés principal para o fundo do tanque.

b. Tanques <sup>3</sup>⁄<sub>4</sub> até 6/7: 8.0, 8.5, 10.5,11.0 e 12.0 mm medidos do convés principal para o fundo do tanque.

#### Aço:Stainless steel E 24 LN (AISI 316 LN )

Propriedades Mecânicas do Aço AISI 316 LN:

Tabela 9.13: Valores das Tensões de deformação e ruptura.

Propriedade	Símbolo	MPa
Tensão de Deformação	$\sigma_d$	205
Tensão de Ruptura	$\sigma_r$	515

No caso de desenvolvimento interno de pressão, verifica-se experimentalmente que a distribuição de forças resulta na deformação do mesmo antes que seja atingida a ruptura. Deste modo, um tanque retangular tende a se aproximar de uma esfera, caso as espessuras e as propriedades mecânicas sejam semelhantes em todos os lados.

A figura (a) ilustra um corte interno do tanque, já a figura (b) ilustra o aumento de pressão interna causando esforço nas paredes, resultando na deformação do perfil interno conforme a figura (c).



a-) Tanque Retangular



b-) Aumento de Pressão interna causando esforço nas paredes



c-) Deformação do tanque, devido ao aumento de pressão

Figura 9.10: Deformação proposta para o tanque devido aumento interno de pressão

Deste modo, na iminência de ruptura, as distribuições de tensões podem ser idealizadas para o caso de uma "esfera", conforme a Figura 9.11.



Figura 9.11. Distribuição ilustrativa de forças na iminência de ruptura do tanque.

Apesar de tal idealização diferir do caso real devido às diferenças de propriedades mecânicas das chapas do tanque, este conceito é útil para mostrar que num caso extremo de deformação, a força de ruptura é igual ao produto da pressão pela área interna e a força de tração um produto da tensão de ruptura pela espessura e pela circunferência da esfera.

Deste modo, pode-se escrever com base na referencia Melconian (1993): Força de Ruptura = Força de tração P.A<sub>i</sub> = 2.h.l. $\sigma_r$  (9.9(a)) Onde : P = Pressão Interna A<sub>i</sub> = Área Interna h = Espessura da Chapa .l = Comprimento  $\sigma_r$  = Tensão de Ruptura

A velocidade de ruptura é estimada em função da taxa de aumento de pressão no interior do tanque. Obtem-se isto derivando a equação9.9 (a) com relação ao tempo:

$$\frac{\partial}{\partial t} [Força de Ruptura] = \frac{\partial}{\partial t} [Força de tração]$$
(9.9(b))  
$$\frac{\partial}{\partial t} [P.A_i] = \frac{\partial}{\partial t} [2.h.l.\sigma_r]$$
(9.9(c))

$$\frac{d}{dt}[P.A_i] = \frac{d}{dt}[2.h.l.\sigma_r]$$
(9.9(d))

mas A, , h , o, são constantes, assim :

$$A_{i} \cdot \frac{dP}{dt} = [2.h.\sigma_{r}] \frac{dI}{dt}$$
(9.9(e))

$$\therefore \quad \frac{dI}{dt} = \frac{A_i \cdot \frac{dP}{dt}}{[2.h.\sigma_r]} = taxa \ de \ propagação \ de \ ruptura$$
(9.9(f))

Como:

178

$$\frac{dP}{dt}$$
, V<sup>1/3</sup> = Kg (9.9(g))

Onde :

Kg = Constante experimental e V = volume interno(9.9(h))teremos :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{A_i \cdot Kg}{[2.h.\sigma_r]} = taxa de propagação de ruptura (9.9(i))$$

Para determinar a pressão de ruptura e a taxa de propagação de ruptura utilizou-se os seguintes valores:

 $\sigma_r$  (tensão de ruptura) = 515 MPa = 5150 bar

Kg (Coeficiente de aumento de pressão (NFPA 68))= 75 bar-m/s

h ( espessura do tanque) = varia de 8,00 a 15,00 mm

Dimensões do tanque:

Comprimento= 15 metros

Largura= 9,2 metros

Altura = 9,2 metros

Volume =  $1280 \text{ m}^3$ 

Área considerando as menores dimensões, que no caso são a largura e Altura= 554,2 m<sup>2</sup>.

$$PA_{i} = 2h I\sigma_{r}$$
(9.10(b))

$$\therefore P = \frac{2.h.l.\sigma_r}{A_i} = \frac{2.0,008.15.5150}{554,2} = 2,23 \text{ bar}$$
(9.10(c))

Considerando o casco do navio que possui 9,5 mm tem-se uma pressão de ruptura de 2,65 bar.

Taxa de propagação de ruptura = 
$$\frac{dI}{dt} = \frac{A_i \cdot Kg}{[2.h.\sigma_r]} = \frac{554, 2.75/1280^{1/3}}{2.0,008.5150} = 46,46 \text{ m/s}$$
  
(9.10(d))

Considerando o aumento de pressão dentro do tanque e a propagação da trinca pode-se elaborar um sistema de equações que relacione a geração da área de ventilação com o desenvolvimento da pressão interna.

Neste caso, partiu-se da premissa de que a taxa de propagação da ruptura é diretamente proporcional ao diâmetro da área de ventilação produzida conforme Kinney (1985) e Smith (1995).

Uma vez que a trinca não segue um caminho reto, nem a área de ventilação forma um orifício perfeitamente cilíndrico, pode-se utilizar um coeficiente de descarga referente ao fluxo de gás no alívio de pressão.

Existem na literatura dois tipos de modelos para descrever a taxa de aumento de pressão interna Kinney (1985) e Smith (1995).

O primeiro modelo é denominado de lei cúbica de aumento de volume e relaciona a taxa de aumento de pressão com uma constante e a raiz cúbica do volume em questão, de modo que a taxa é invariável. Tal modelo é proveniente de resultados experimentais colhidos em bombas manométricas de até 20 litros de volume. O segundo modelo considera que a taxa de aumento de pressão é função da pressão interna, de modo que a taxa é variável Kinney (1985) e Smith (1995).

Para o caso de taxa de aumento de pressão constante tem-se, seguindo o sistema sugerido por Kinney (1985).

Taxa de aumento de pressão = 
$$\frac{dP}{dt} = \frac{K_g}{V^{1/3}}$$
 (9.11(a))

Taxade alívio de pressão =

$$-\frac{dP}{dt} = 375Cd\left(\frac{Av}{V^{1/3}}\right)P \text{ Onde :} \begin{cases} Cd = Coeficiente de descarga\\ 0,62 < Cd < 1\\ Av = Area de ventilação = \frac{\pi . D^2}{4} \end{cases}$$
(9.11(b))

$$D = \frac{dl}{dt} \Delta \Delta$$
, quando P > Pressão de ruptura

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\sqrt{1/3}}{[2 h \sigma_r]}$$
(9.11(b))

onde K<sub>g</sub> é o coeficiente de aumento de pressão em barm/s

A equação de alívio de pressão foi desenvolvida por sugerido por Kinney (1985).

Considerando este sistema de equações, que Cd = 1 e aplicando o método de Runge-Kutta de 4 ordem foi possível construir os gráficos apresentados nas Figuras 9.12 e 9.13.



Figura 9.12 Gráfico do comportamento da Pressão Interna Considerando Rompimento no Tanque



Figura 9.13: Gráfico da área de ventilação em função do tempo

O máximo de pressão interna é atingido com 2,494 bar em 0,57 s e a área de ventilação se estabiliza após 0,101 s, em 16,95 m<sup>2.</sup>

A área mínima de ventilação conforme a NFPA 68 (Guide for Venting Deflagrations 2002) pode ser estimada através das seguintes metodologias:

1-) Para o caso de esforço de baixa intensidade:

- Pref (pressão referenciada) não excede 1,5 psi , ou 0,1 bar.
- Pref deve exceder a pressão estática (Pstat) por 0,35 psi, ou 0,02 bar.
- Velocidade de queima não deve exceder 1,3 vezes a velocidade de queima do propano, caso contrário outro método deve ser utilizado.
- 2-) Para o caso de esforço intenso:
- Pref (pressão referenciada) maior que 1,5 psi, ou 0,1 bar.
- Pref deve exceder a pressão estática (Pstat) por no mínimo 0,05 bar.
- Coeficiente de aumento de pressão, K<sub>g</sub> ≤ 550 bar-m/s
- Pstat ≤ 0,5 bar.

Calculando a pressão de ruptura em 2,23 bar, com base na equação 9.9. Pode-se aplicar a correlação apresentada na equação 9.12 para cálculo de área de ventilação (Kinney, 1985).

 $Av = \left[ (0,127 \log(Kg) - 0,0567) P_{ref}^{-0,582} + 0,175 P_{ref}^{-0,572} (Pstat - 0,01) \right] V^{2/3}$ (9.12)

Considerando:

P<sub>ref</sub> =2,23 bar

Pstat = 0,11 bar

Kg= 75 bar-m/s

V= 1280 m<sup>3</sup>

A área de ventilação (Av) será de 13,54 m<sup>2</sup>.

A área obtida anteriormente possui um desvio de 20,11% em relação ao valor estimado pela correlação da.

O outro modelo que pode ser usado para representar a taxa de aumento de pressão interna é apresentado à seguir :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} = C_r \cdot (\frac{S}{\sqrt{r}}) (P - P_{ind}) (P_{ad} - P) & (9.13(a)) \end{aligned}$$
onde :  

$$P = Pressão (bar) \\ t = tempo \\S = Årea Superficial (m2) \\V = Volume (m3) \\C_r = Coeficiente de aumento de Pressão (\frac{m}{bar.s}) \\C_r = \frac{C_r(max)}{1+20(RE-1)}, para o metanol vale 0,6 \frac{m}{bar.s} & (9.13(b)) \\RE = razão estequiométrica = \frac{VF (C + \frac{H}{4} - \frac{O}{2})}{0,21(1 - VF)}; & (9.13(c)) \\VF = Fração molar de vapor = \frac{0,21RE}{0,21SFF + (C + \frac{H}{4} - \frac{O}{2})} & (9.13(d)) \\onde : \end{aligned}$$

C = número de átomos de carbonos na molécula

H = número de átomos de hídrogênios na molécula

O = número de átomos de oxigênios na molécula

Neste novo modelo a pressão influencia a taxa de geração de pressão interna, bem como a concentração de material inflamável. No caso em questão adotou-se uma razão estequiométrica.

O gráfico da figura 9.14 ilustra uma comparação entre as taxas de aumento de pressão. O valor da taxa de aumento de pressão que é constante é sempre maior do que o modelo de taxa dependente de pressão. Esta diferença pode ser atribuída a um efeito de escala.

Embora eq 9.12 utilize uma taxa constante, seu modelo baseia-se em valores colhidos em experimentos de pequenas dimensões que estão sujeitos ao efeito de escala. Já o modelo de taxa dependente da pressão interna foi desenvolvido visando descrever o comportamento em sistemas com volume muito superior ao de uma bomba manométrica.



Figura 9.14: Taxa de aumento de pressão e pressão interna.

Para esta nova situação a área de ventilação fica estimada em 10,58 m<sup>2</sup>. Se Cd=0,81, conforme proposto por Bosh (1997) a área de ventilação será de 13,13 m<sup>2</sup>, com pressão máxima em 0,084 s, com diferença de 3,03 % do estimado pela correlação da eq.9.12.

Assim a aplicação de um modelo de taxa constante de aumento de pressão derivada de dados de bomba manométrica requereu um coeficiente de descarga com valor máximo para dar resultados próximo do obtido pela aplicação da correlação da eq. 9.12.

Com a alteração do modelo de taxa de aumento de pressão, para um modelo desenvolvido para grandes escalas o valor de coeficiente de descarga mais realista de 0,81 foi adotado de modo que o resultado se aproximou do estimado pelas equações propostas pela eq. 9.12.

Comparando os modelos desenvolvidos apresentou-se os resultados para o caso de taxa de aumento de pressão constante e coeficiente de descarga igual a 1 e outro com taxa de pressão variável e coeficiente de descarga de 0,81 :



Figura 9. 15: Gráfico comparativo de modelos desenvolvidos

Verificando as rupturas ocorridas no tanque estudado, observou-se que existe um rompimento no convés cujo comprimento excede o comprimento do tanque.



Figura 9.16 : Desenho esquemático ilustrando a deformação na antepara central e o rompimento do convés

Como já foi visto, uma ignição dentro daquele tanque causaria uma rápida elevação de pressão até que houvesse um rompimento nas chapas metálicas. Tal fato proporcionaria uma área de ventilação ocasionando um alívio de pressão. Com base na equação para estimativa de área de alivio de pressão da NFPA 68 montou-se o gráfico á seguir.



Figura 9. 17: Gráfico da Pressão máxima e Área de Ventilação.

Com base nestes resultados, pode-se verificar, que com o aumento da pressão admissível dentro do tanque, se reduz a área de ventilação.

No caso do tanque estudado a área rompida se constitui da área do topo do tanque (convés), antepara central e antepara longitudinal (divisória com o tanque a ré do mesmo). A área envolvida foi então estimada em 264 m<sup>2</sup>.

Tendo em consideração que:

1-) A menor espessura encontrada foi de 8 mm de aço AISI 326LN, de modo que a menor pressão de ruptura para o tanque foi estimada em 2,23 bar.

2-) As áreas de alívio estimadas para valores acima de 1 bar estão situadas abaixo de 25 m<sup>2</sup>, assim as áreas de alívio estimadas são menores do que 10% da área observada.

Pode-se concluir que o fenômeno de aumento de pressão no interior daquele tanque não seguiu uma cinética capaz de gerar uma área de alívio compatível com o considerado pela equação da NFPA 68. Isto indica que o processo seguiu outro mecanismo de combustão.

Assim, a cinética de formação e propagação de ruptura depende da taxa de aumento de pressão em relação ao tempo. No caso de deflagração, a onda

de pressão gerada possui um valor bem menor do que ocorre na detonação, conforme é ilustrado na figura 9.18.



Figura 9.18: Comparação das taxas de aumento de pressão nos casos de deflagração e detonação.

Para avaliar a destruição observada no tanque estudado, o valor da taxa de aumento de pressão com o tempo, utilizou-se inicialmente o sistema proposto por Kingery (1962) considerando uma taxa constante de aumento de pressão e de maior velocidade de combustão.

A taxa utilizada será maior do que a existente experimentalmente e será denominada de taxa acelerada de combustão.

Tomando por base o rompimento do casco, cuja espessura era de 9,5 mm em aço AISI 316 LN, pode-se estimar a taxa de aumento de pressão, pressão máxima e tempo de duração em função do tamanho da ruptura e dos coeficientes de descarga. Cabe ressaltar, que para que o exemplo seja realista, considerou-se que após o início da ruptura a trinca se propagara em dois sentidos.

Com estes dados montou-se a tabela a seguir:

				Coeficiente de
Comprimento da	Pressão máxima	Duração	dP/dt	descarga
ruptura (metros)	(bar)	(segundos)	(bar/s)	Cd
	3,07065	0,0324	38,8287	0,62
15	3,07047	0,0248	50,536	0,81
	3,07123	0,0200	62,4555	1,00
	3,03952	0,0352	33,0425	0,62
14	3,03954	0,0270	43,059	0,81
	3,0404	0,0218	53,2667	1,00
	3,00854	0,0386	27,785	0,62
13	3,00902	0,0296	36,314	0,81
	3,00806	0,0240	44,478	1,00
	2,97728	0,0426	22,9771	0,62
12	2,97756	0,0326	30,007	0,81
	2,97786	0,0264	37,0366	1,00
	2,94668	0,0474	18,7447	0,62
11	2,94642	0,0364	24,3965	0,81
	2,94642	0,0296	30,0613	1,00
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2,91556	0,0534	14,9106	0,62
10	2,91554	0,0410	19,443	0,81
	2,91567	0,0332	23,9865	1,00

Tabela 9.14: Valores para o modelo de Kingery acelerado, e pressão de ruptura de 2,64 bar

Como se pode perceber as taxas de pressão ficaram acima de 14,9106 bar/s, atingindo 62,4555 bar/s, ou seja, os valores da taxa de pressão obtidos são de 2 a 9 vezes maiores do que o valor anteriormente utilizado tomando por base a lei cúbica de aumento de pressão.

Apesar do comprimento ter variado de 10 a 15 metros e o coeficiente de descarga ter oscilado de 0,62 a 1,00, a pressão de pico permaneceu restrita a uma faixa relativamente estreita variando de 2,915 bar a 3,0712 bar ( desvio de cerca de 5 %). Já a duração se situou numa faixa entre 0,0200 s e 0,0534 s.

# 9.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTI-ENERGÉTICO

Embora o valor da pressão de pico se mostre fortemente dependente do comprimento da ruptura, variando muito pouco em função da taxa de aumento de pressão e do coeficiente de descarga, o mesmo não ocorre com o tempo de duração.

Assim, os resultados mostram que o rompimento do tanque estudado deveu-se a um processo de combustão bastante acelerado envolvendo uma alta taxa interna de variação de pressão com o tempo.

Com base no método Multi-Energético (TNO), Bosh (1997), tem-se a tabela a seguir, que indica como os diversos fatores contribuem para geração da sobrepressão. No caso Prs é a razão entre a pressão resultante pela pressão ambiente.

Tabela 9.15: Categoria de intensidade com respectivos fatores de energia de ignição, grau de obstrução e confinamento por planos paralelos, além a sobrepressão resultante Prs.

Categoria de	Ener ign	gia de ição		Obstrução	)	Planos p	paralelos	Classe	Prs
Intensidade	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Não	Sim	Não		
1	{	x	x			х		7a10	1 a 10
2		x	x				x	7a10	1 a 10
3	x		x	_		x		5a7	0,2 a 1
4		x		x		x		5a7	0,2 a 1
5		x		x			x	4a6	0,1 a 0,5
6		x			x	x		4a6	0,1 a 0,5
7	×		×				x	4a5	0,1 a 0,2
8		x		_	х			4a5	0,1 a 0,2
9	x			x		х		3a5	0,05 a 0,2
10	x			_ x			x	2a3	0,02 a 0,05
11	x				x	x		1a2	0,01 a 0,02
12	x				x		x	1	0,01

De forma geral, os fatores podem ser descritos como:

1- Obstrução:

Alta: Obstáculos próximos, com distância menor do que 3,0 m e volume de bloqueado de 30%, ou seja, a razão entre volume ocupado e volume total superior a 30 %.

Baixa: Razão de volume bloqueado menor do que 30% ou espaços entre bloqueios maior do que 3,0 m.

Nenhuma: Sem obstáculos na nuvem gasosa.

2 - Confinamento por plano Paralelo:

Sim: a nuvem gasosa ou parte dela estão confinadas por paredes/ barreiras por dois ou três lados.

Não: A nuvem não se encontra confinada exceto pelo chão.

3 - Intensidade de Ignição.

Alta: A fonte de ignição se encontra parcialmente confinada de forma a liberar um jorro de material incandescente na nuvem inflamável, como exemplo pode-se tubos, motores não blindados, painéis de controle, salas fechadas entre outros.

Baixa: A ignição ocorre por faíscas, chama, superfícies quentes entre outros.

Os estudos mais recentes apresentam correlações para estimativas de sobrepressão nos casos de :

- Baixa energia de ignição, nenhum confinamento e presença de obstrução.
- Baixa energia de ignição, Confinamento entre placas paralelas e presença de obstrução.

Tais correlações abrangem cerca de 50% das categorias listadas acima.

No caso do rompimento do tanque em questão a pressão desenvolvida foi maior do que a pressão de ruptura do convés, estimada em 2,64 bar.

Keenan, W. A., desenvolveu um método para relacionar a sobrepressão com a pressão de rupturas de chapas metálicas. Segundo o autor, em experimentos conduzidos com 64 chapas metálicas, considerando carregamento uniforme, a razão entre a sobrepressão e a pressão de ruptura média foi de 1,192. Para 430 casos considerando carregamento não uniforme a razão foi estimada em 1,180.

Em todos os casos a duração da sobrepressão excedeu o período fundamental de deformação da chapa metálica. Para casos de menor duração, foi observada que a razão aumentou para valores acima de 2,45. Gureke, (1992) estudou o efeito de sobrepressão em chapas metálicas por explosão de cargas explosivas e obteve para as extremidades da chapa uma razão de 1,25 e para o meio da mesma 1,1765.

Considerando que a ruptura no casco do tanque estudado, ocorreu na metade da largura sobre o tanque, então, baseados no valor de razão de 1,180 e pressão de ruptura de 2,640 a sobrepressão explosiva pode ser estimada em 3,115 bar.

As pressões de pico calculadas anteriormente variaram entre 2,915 bar a 3,0712 bar, de modo que o erro em relação a sobrepressão explosiva variou entre 1,4 a 6,1 %. Deste modo, apesar de suas límitações o modelo de Kingery, apresentado por Kinney (1985), forneceu valores condizentes com o estimado a partir de observações experimentais.

A luz do método multi-Energético, pressões maiores ou iguais a 3,115 bar ocorrem para classes de 8 a 10, onde a categoria de intensidade é 1 ou 2.

Nas duas categorias de intensidade previstas, existem fatores de fonte de ignição forte e obstrução alta. De modo que, a destruição verificada no tanque estudado se justifica através de uma fonte de ignição forte no interior do tanque intensificada pelo efeito de obstrução.

O método Multi-Energético (TNO) fornece para as diversas classes valores de pressão reduzida e tempo reduzido, para determinar-se os índices deve-se seguir a seguinte metodologia:

Para estimativa da Pressão e do tempo de duração :

 $\frac{ro}{\left(\frac{E_a}{P_a}\right)^{1/3}}$ Onde :

 $E_a$  é a energia disponível, dada pelo produto entre o volume e o valor de 3,5MJ/m<sup>3</sup>. P<sub>a</sub> é a pressão ambiente.

ro é o raio da esfera equivalente ao volume inflamável =  $\sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi}}$ . (9.14(b))

Grandeza	Valor	Unidade
Energia/Volume		
( É <sub>a</sub> )	3,5	MJ/m3
Volume	1280	m3
Pressão Ambiente		
(Pa)	101,3	kPa
Velocidade do som		
V_som	340	m/s
(E/pa) <sup>1/3</sup>	35,36	
(E/pa) <sup>1/3</sup> / V <sub>som</sub>	0,10401	S
г0=	11,76793	
ro/(E/pa) <sup>1/3</sup>	0,332771	

Tabela 9.16: Estimativa de parâmetros do Método Multi-energético.

Tabela 9.17: Valores estimados de pressão e tempo de duração.

Classe	Р	to	$ \frac{to \left( \frac{E_a}{P_a} \right)}{V_{som}} $	Pressão P.Pa ( bar )
7	0,5	0,4	0,041604	0,507
8	1,75	0,3	0,031203	1,773
9	4	0,2	0,020802	4,052
10	22	0,05	0,005201	22,286

Para obter-se o tempo de duração para sobrepressão de 3,115 bar realizou-se uma interpolação entre os valores das classes 8 e 9. Deste modo, estimou-se em 0,025075 s o tempo de duração da sobrepressão.

Com o modelo de Kingery, apresentado por Kinney (1985), estimou-se picos de pressão de cerca de 3,00 bar com duração entre 0,0200 e 0,0534 s. Contudo, a condição que melhor representou resultados baseados no Método Multi-energético foi rompimento de 15 metros, com coeficiente de descarga de 0,81 apresentando pico de 3,0705 e 0,0248 s. Para estas condições a taxa de variação de pressão com o tempo foi de 50,536 bar/s, ou seja, *Kg* de 548,7032 bar-m/s. Tal valor é 7,31 vezes maior do que o valor tabelado (75 bar-m/s) pela NFPA 68.

Como não foi encontrado na literatura um método para a estimativa da energia inicial de ignição, utilizou-se então a seguinte metodologia baseada nos seguintes pressupostos de Berg (2005)

 1-) Reatividade do metanol similar ao do propano, conforme prevêem os métodos de Baker (1983) e o Bosh (1988).

2-) Que existe uma relação logarítmica entre a energia de ignição e a pressão desenvolvida, de modo que a partir de dois valores de pressão e energia é possível estimar uma terceira condição.

3-) Que a pressão manométrica no ambiente confinado do tanque no evento da combustão gerada pela energia mínima de ignição vale 10 Pa (Berg, 2005).

Deste modo, com os valores do TNO para o propano tem-se:

Pressão	Energia	Ln(Pressão)	Ln(Energia)
(bar)	(Joules)		
22,0	2,5 . 10 <sup>6</sup>	3,091042	14,7318
0,0001	0,25.10	-9,21034	-8,29405

Tabela 9.18: Valores de Pressão e Energia de Ignição

Para estas condições interpolou-se a seguinte equação:

E = exp(1,87180996.ln(P)+8,94595723 ) (9.15) Onde : E = Energia de Ignição (Joules) P = Pressão(bar)

Considerando 3,115 bar a energia de ignição foi estimada em 64.393,13 Joules.

Considerando a ordem de grandeza desta energia de ignição, pode-se descartar causas como atrito, faísca, chama, eletricidade estática, superfícies quentes entre outros. Conforme o método Multi-energético, a fonte de tal energia deve estar associada a uma explosão parcialmente confinada capaz de liberar um jorro de material incandescente no ambiente inflamável interno do tanque. Baseado nisto, e considerando que o único equipamento dentro do tanque era o sistema de bombeamento, verificou-se a seguir a possibilidade de uma explosão interna neste sistema ter proporcionado a energia de ignição calculada.

Se for considerado que o método Multi-energético estabelece uma densidade de energia de 3,5 MJ/m<sup>3</sup>, então para obter-se 64,4 kJ precisaría-se da explosão inicial de um volume de 0,018398 m<sup>3</sup> de mistura metanol-ar.

Contudo, como somente cerca de 30% da energia de uma explosão é utilizada como trabalho de expansão, então deve-se dividir o volume anterior por 30%, obtendo 0,061327 m<sup>3</sup>.

O desenho esquemático apresentado na figura 9.19 ilustra o sistema de sucção do tanque. O motor, à prova de explosão, se situava no convés e movia através de um eixo de mais de 10 metros de comprimento um conjunto de rotores situado na base do tanque. A entrada do sistema de sucção estava dentro de um poço de cerca de 1 metro de diâmetro e 48 cm de profundidade, de modo que todo o tanque precisava ser esvaziado até que sobrasse o volume deste poço. A entrada do sistema de sucção possuía uma chapa, que atuava como uma válvula borboleta permitindo ou não a entrada de líquido no sistema de sucção. O acionamento do sistema de abertura era remoto por meio de um cabo de aço e

194

contava com um sistema de afogamento, que consistia de uma tubulação fina capaz de encher de produto a câmara da entrada de escorva. Quando os rotores giravam por ação do motor a coluna de líquido era bombeada para fora do tanque.



Figura 9.19: Desenho esquemático do sistema de sucção.

O interior do conjunto de sucção, compreendido pelo espaço livre dentro da tubulação e dentro do conjunto de rotores apresenta-se como um ambiente de intenso confinamento e bastante obstrução capaz de promover o desenvolvimento de elevadas pressões de deflagração, a partir de uma baixa energia de ignição.

Experimentalmente, (Berg, 2005), tem sido observado que em tubulações contendo obstrução que a pressão máxima se desenvolve a partir de uma baixa energia de ignição, a uma pressão máxima num comprimento de cerca de 15 a 30 vezes o diâmetro interno da tubulação. Neste caso, precisar-se-ia de um comprimento de 2,28 m a 4,57 m para o pleno desenvolvimento da deflagração, havendo disponibilidade de cerca de 10 metros de tubulação.

Assim, havia condições dentro do sistema de ignição para promover uma violenta deflagração, podendo atingir o regime de detonação. No caso da tubulação, considerando 6 in de diâmetro externo, com 5 mm de espessura e aço AISI 316 LN estima-se a pressão de ruptura num valor acima de 107 bar. Considerando tal resistência, a tubulação além de promover as condições necessárias para o desenvolvimento de elevadas pressões também proporcionou um direcionamento da explosão tanto para o fundo do tanque como para o convés atingindo o conjunto motor- eixo.

Como já foi visto, a energia de ignição foi estimada em 64,4 kJ. Tal valor equivale a explosão de 0,061327 m<sup>3</sup> de mistura metanol-ar.

Considerando que o sistema de sucção era constituído de uma tubulação de 6 in e com eixo interno de 2 in, proporcionando um volume interno de tubulação de 0,016214 m<sup>3</sup> por metro de tubulação, pode-se estimar que o volume de ignição compreendia cerca de 3,78 metros de tubulação.

Como a tubulação mais o conjunto de rotores compreendiam quase 10 metros de comprimento, podemos finalmente estimar, que parte da energia da explosão interna, cerca de 64,4 kJ referentes a 3,78 metros foram transmitidos ao interior do tanque, a energia restante referente a 6,22 metros avaliada em 105,87 kJ foi transmitida ao conjunto motor e eixo, causando o arremesso de ambos.

O ambiente interno do conjunto de sucção favorecia o desenvolvimento de elevadas pressões de deflagração a partir de baixas energias de ignição. Neste caso a causa da explosão interna do conjunto de sucção pode ser associada à faísca, chama, superfície quente entre outras.

No início da perícia da explosão havia uma dúvida sobre se o tanque estudado continha ou não 30% de seu volume com líquido, mas como foi demonstrado, a energia de ignição para explosão do referido tanque é compatível com a energia liberada por uma explosão interna apenas do sistema de sucção.

Como não há possibilidade de explosão interna durante o bombeamento ,visto o líquido ocupar todo o volume interno, concluímos que a explosão ocorreu sem que houvesse fluxo de líquido, permitindo a formação de uma atmosfera vapor de metanol-ar.

A causa da explosão interna do conjunto de sucção pode ser associada à faísca, chama, superfície quente, atrito e a eletricidade estática. Dentre estas causas a eletricidade estática pode ser descartada devido a dois fatores, primeiramente a natureza do metanol de não formar cargas estáticas durante seu

bombeamento e em segundo ao fato de que o navio estava aterrado. As demais causas só são viáveis com o funcionamento do motor. De onde deduzimos que o sistema de bombeamento estava funcionando sem bombear, o que é possível somente no caso de tanque vazio.

Dentro do sistema de sucção a energia de rotação do motor era transmitida aos rotores através do eixo.

Havia possibilidade de atrito tanto nos mancais de suporte do eixo como nos rotores.

Uma ignição nos mancais geraria uma deflagração, que seria intensificada pela presença de confinamento e obstrução dos mancais internos. Já uma ignição no conjunto dos rotores seria imediatamente intensificada pela turbulência da rotação dos rotores, causando aceleração no processo de deflagração. Outro fator a ser considerado é que a área superficial sujeita a atrito mecânico nos rotores é muito maior do que a área sujeita a atrito nos mancais. Além disso, o funcionamento dos rotores em uma atmosfera de vapor de metanol-ar esta sujeita a um aquecimento capaz de tornar a mistura gasosa mais sensível à iniciação por atrito. Neste contexto basta uma energia mínima de iniciação de 0,14. 10<sup>-3</sup> Joules para ignição.

Deste modo, embora haja probabilidade de haver uma ignição nos mancais, existem no conjunto de rotores as condições mais propícias à ignição devido à faisca, chama, superfície quente e atrito.



Figura 9.20 : Desenho esquemático dos efeitos da explosão no interior do sistema de sucção.

Com a explosão do sistema de sucção houve um rompimento da câmara de entrada do sistema de sucção sendo esta arremessada violentamente de encontro ao poço de sucção. Devido ao perfil frontal achatado da câmara de sucção, e a presença de líquido residual no poço de sucção, o impacto da câmara em alta velocidade com o líquido gerou a formação de uma onda de pressão, cuja ação na chapa do fundo do poço de sucção causou uma deformação gerando um perfil convexo, vide figura 9.20.

# Capítulo 10

# Distâncias de Segurança para Nuvens Gasosas

#### 10.1 INTRODUÇÃO

No tratamento de materiais inflamáveis, o critério de distância de segurança baseia-se nos riscos associados a queimaduras por radiação térmica decorrente da chama produzida pela queima do material inflamável. De modo que não havia uma previsão do risco associado a onda de sobrepressão oriunda da explosão do navio.

Embora houvesse sempre o risco de uma explosão de um tanque contendo material inflamável, a experiência indicava que os danos devido a esta explosão deveriam ser mínimos. Entretanto, como foi visto anteriormente, a explosão do navio não seguiu a cinética de uma combustão iniciada por uma fonte de ignição fraca tais como superfície quente, faísca, chama ou atrito. Muito pelo contrário, a cinética da combustão foi bastante acelerada em decorrência da explosão interna do sistema de sucção do tanque estudado no capítulo anterior.

#### **10.2 DESENVOLVIMENTO**

A intensidade de uma explosão em uma atmosfera inflamável depende de fatores como energia de ignição, grau de obstrução e da existência ou não de planos paralelos. Assim, existem inúmeras possibilidades para a sobrepressão decorrente de uma explosão.

Segundo o Método Multi-Energético (Bosh, 1997), e como já visto no capítulo 2, a pressão de explosão pode variar de 0,01 a 10 vezes a pressão ambiente, conforme pode-se observar na tabela 10.1.

	Energ	gia de	]						Prs
Categoria de	igni	ção	0	bstruça	ăo	Planos	paralelos	Classe	bar
intensidade	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Não	Sim	Não		
1		Alta	Alta			Sim		7 a 10	1 a 10
2		Alta	Alta				Não	7 a 10	1 a 10
3	Baixa		Alta			Sim		5a7	0,2 a 1
4		Alta		Baixa		Sim		5a7	0,2 a 1
5		Alta		Baixa			Não	4a6	0,1 a 0,5
6		Alta			Não	Sim		4a6	0,1 a 0,5
7	Baixa		Alta				Nāo	4a5	0,1 a 0,2
8		Alta			Não			4a5	0,1 a 0,2
9	Baixa			Baixa		Sim		3a5	0,05 a 0,2
10	Baixa			Baixa			Não	2 a 3	0,02 a 0,05
11	Baixa				Não	Sim		1a2	0,01 a 0,02
12	Baixa				Não		Nāo	1	0,01

Tabela 10.1: Categoria de intensidade com respectivos fatores de energia de ignição, Grau de Obstrução e Confinamento por Planos Paralelos, além a sobrepressão resultante Prs

O estudo de explosões e efeitos com base no equivalente TNT permitiu que se estabelecessem distâncias de segurança em termos da distância escalada reduzida. Utilizando as curvas de Kingery-Bulmash (Absil, 1998) pode-se relacionar aquela distância com um valor de sobrepressão.

O Método Multi-Energético utiliza gráficos com curvas características típicas para cada Classe de intensidade de explosão. Nesses gráficos a sobrepressão está associada a um parâmetro denominado de raio escalada, que é dado por:
201

(10.1(c))

$$R = \int_{3}^{r} \frac{Ea}{P_{A}}$$
(10.1(a))  

$$R = \text{Raio em escala}$$
  

$$r = \text{distância em metros do epicentro da núvem explosiva}$$
  

$$P_{A} = \text{Pressão atmosférica em kPa}$$
  

$$Ea = \text{Densidade de Energia disponível} = (3,5.10^{6} \text{ J/m}^{3}) \text{V}$$
  

$$V = \text{volume}(\text{m}^{3})$$
  

$$3,5.10^{6} \text{ J/m}^{3} = \text{Densidade de Energia de Combustão do Método Multi – Energético}$$
  

$$P_{A} = \text{Pressão ambiente emPa.}$$
  

$$\therefore r = \text{R.}_{3} \sqrt{\frac{Ea}{P_{A}}} = \text{R.}_{3} \sqrt{\frac{(3,5.10^{6} \text{ J/m}^{3}) \text{V}}{P_{A}}} = \text{R.}_{3} \sqrt{\frac{(3,5.10^{6} \text{ J/m}^{3}) \text{V}}{101.300 \text{ Pa}}}$$
  

$$\therefore r = \text{R.}_{3},257.\sqrt[3]{V} = \text{K.}_{3}\sqrt{V}$$
(10.1(b))

 $\mathbf{P}_{\mathbf{A}}$ 

 $P_A$ 

Onde : K = 3,257.R

K será denominado de multiplicador de distância de Segurança para VCE

Para o caso do TNT tem-se na tabela 10.2 a seguinte relação de distâncias reduzidas e sobrepressões.

Distância escalada m/kg <sup>1/3</sup>	Sobrepressão kPa
11	13,086
22	11,067
44	4,188
60	2,699

Tabela 10.2: Distância Reduzida e Sobrepressão

Embora a ignição de uma atmosfera inflamável possa levar a diversas intensidades de explosão, pode-se observar que no gráfico do método multienergético, figura 10.1, para raios reduzidos maiores que 2, a curva de sobrepressão é a mesma para os casos variando de 0,5 a 10 vezes a pressão ambiente.



Figura 10.1 Gráfico do método Multi-Energético

Deste modo, para os casos de explosão violenta com intensidade inicial maior do que 0,5 vezes a pressão ambiente podemos adotar um mesmo raio escalada desde que o valor seja maior do que 2.

Como não se dispõe das equações das curvas, retirou-se alguns valores do gráfico a fim de elaborar-se uma curva de ajuste, conforme apresentado na tabela 10.3.

P (bar)	R	ln(P)	Ln( R)
0,1	3	-2,30259	1,098612
0,05	5	-2,99573	1,609438
0,007	30	-4,96185	3,401197
0,005	40	-5,29832	3,688879
0,002	90	-6,21461	4,499810

Tabela 10.3: Valores de sobrepressão e raio escalada retirados do gráfico do método multienergético. O ajuste seguiu uma curva log-log.

Deste modo, foi possível ajustar a seguinte equação:

$$Pressão = exp(-1,1367.in(R) - 1,1041)$$
(10.2(a))

Com esta equação pode-se obter os valores do raio escalada para as distâncias escalada de interesse, conforme tabela 10.4 e com isto de terminar-se os diversos valores para o parâmetro K conforme a tabela 10.5.

Tabela 10.4: Estimativa do parâmetro multiplicador para distância de segurança de VCE.

Distância Escalar m/kg <sup>1/3</sup>	Sobrepressão KPa	Raio Reduzido ( R ) (admensional)	Multiplicador de segurança para VCE K (K= 3,257 . R)
11	13,087	2,2912	7,46
22	11,067	2,6552	8,65
44	4,188	6,2425	20,33
60	2,699	9,1881	29,93

Distância Escalar Sem Talude Para Altos Explosivos	Multiplicador de distância de segurança para VCE	Publico indicado para utilização da distância escalar:
11 m/kg <sup>1/3</sup>	7,46	Publico sujeito a 1% de óbito e 30 % de ferimentos hospitalizáveis. Necessidade de abrigo com construção reforçada para proteção de pessoal. Distância mínima para oficinas, não sendo recomendada para escritórios.
22 m/kg <sup>1/3</sup>	8,65	Publico sujeito a 5 % de ferimentos que necessitarão de atendimento médico e hospitalização, havendo reduzida probabilidade de óbito. Existirá necessidade de evacuação de feridos. Para minimizar o número de feridos é importante que nestas áreas não haja locais típicos de concentração de pessoal como clubes, cinemas, escolas entre outros, nem locais onde haja publico de risco como creches e asilos. Bairros estritamente residenciais apresentam características de menor concentração e menor quantidade de público de risco como idosos e crianças e, portanto podem estar situados dentro desta distância escalar. Cabe ressaltar que os danos causados serão alvos de processos judiciais cujo valor total envolvido pode causar o fechamento definitivo do negócio.
44 m/kg <sup>1/3</sup>	20,33	Publico sujeito a 1 % de ferimentos não havendo probabilidade de óbito mas grande possibilidade de pânico devido a quebra de janelas e estruturas de gesso. Existirá necessidade de evacuação de feridos e do pessoal em pânico. Devido ao reduzido número de feridos é possível localizar nestas áreas empreendimentos onde haja concentração de pessoal como clubes, igrejas, cinemas, escolas entre outros. Contudo, esta distância é imprópria para tanto a população mais sensível fisicamente a risco como creches, hospitais e asilos, como para população situada em empreendimentos mais sensíveis aos efeitos das ondas de sobrepressão, que podem resultar em aumento considerável de feridos, como prédios contendo grande fachadas de vidros como shopping centers e prédios comerciais.
60 m/kg <sup>1/3</sup>	29,93	Publico sujeito a reduzida probabilidade de ferimento. Ideal para público sujeito a condições especiais como asilos, hospitais e creches e para empreendimentos mais sensíveis aos efeitos das ondas de sobrepressão como prédios contendo grande fachadas de vídros como shopping centers e prédios comerciais.

### Tabela 10.5: Tabela de Distância escalar de segurança para diversos tipos de público

\_\_\_\_\_

Na tabela 10.6 apresenta-se exemplos de distância de segurança para VCE considerando diversos volumes.

		Valor	de K						
Volume	7,46	8,65	20,33	29,93					
M <sup>3</sup>	Distância de Segurança (m)								
100	34,64	40,14	94,37	138,90					
200	<u>43,</u> 64	50,57	118,90	175 <u>,</u> 01					
300	49,96	57,89	136,11	200,33					
400	54,98	63,72	149,81	220,50					
500	59,23	68,64	161,37	237,52					
600	62,94	72,94	171,49	252,40					
700	66,26	76,79	180,53	265,71					
800	69,27	80,28	188,74	277,81					
900	72,05	83,50	196,30	288,93					
1000	74,62	86,48	203,32	299,26					
1200	79,30	91,90	216,06	318,01					
1400	83,48	96,74	227,45	334,78					
1600	87,28	101,15	237,80	350,01					
1800	90,78	105,20	247,33	364,03					
2000	94,02	108,96	256,17	377,04					
2500	101,28	117,37	275,95	406,16					
3000	107,63	124,73	293,24	431,61					
3500	113,30	131,30	308,70	454,36					
	118,46	137,28	322,75	475,04					
4500	<u>123,20</u>	142,78	335,67	494,06					
5000	127,61	147,88	347,67	511,72					
5500	131,72	152,65	358,89	528,24					
6000	135,60	157,14	<b>369,45</b>	543,79					
6500	139,27	161,39	379,44	558,49					
7000	142,75	165,43	388,93	572,46					

Tabela 10.6: Distâncias de segurança para VCE

CONCLUSÃO

A proximidade de paióis com a linha ferroviária, no início do século XX foi o fator fundamental que motivou o estudo e elaboração da primeira tabela de distância de segurança nos EUA, datada de 1914.

O desenvolvimento da produção de explosivos mais energéticos nas décadas de 40, 50 e 60 e acidentes envolvendo grandes quantidades de explosivos causando elevados prejuízos humanos e financeiros motivaram diversas revisões nas tabelas de segurança, conduzindo aos valores atualmente utilizados.

Hoje, o crescimento das cidades, a valorização dos terrenos, o aumento da preocupação com o bem estar social e valorização da vida são os fatores que mais influenciam na busca de condições para a redução do risco as populações adjacente aos centros de fabricação e estocagem de explosivos.

Ocorre que as distâncias de segurança adotadas no Brasil para os casos de paióis e oficinas protegidos com barricadas ou taludes estão entre as menores do mundo, tendo em vista que ainda utilizamos os valores decorrentes da Tabela Americana de Distâncias "American Table of Distances" da década de 50, que quando revista teve suas distâncias aumentadas, e que, conforme a legislação americana da época, adotava um critério, já abolido, de permitir uma redução de 50% na distância de segurança para os casos de emprego de taludes ou barricadas.

Assim, num momento em que surge a necessidade de se rever o conceito de distância de segurança a fim de se proporcionar maior proteção aos estabelecimentos adjacentes, deparou-se com o fato de se adotar no país uma tabela de distância de segurança que necessitaria de aumento em seus valores praticados.

A legislação americana baseia-se na análise de uma série de experimentos envolvendo testes com residências submetidas a ação de grandes quantidades de explosivo, resultando na definição de uma distância de segurança baseada no critério de danos patrimoniais, fixados em 5%. A legislação de países como França, Suíça, Suécia, Noruega foram influenciadas pela legislação inglesa que França, Suíça, Suécia, Noruega foram influenciadas pela legislação inglesa que baseou-se na análise de Jarret da destruição causada pelo bombardeamento da Inglaterra durante a segunda Guerra Mundial.

Na Inglaterra, a distância de segurança se baseia na reduzida probabilidade de desmoronamento de paredes, bem como na baixa probabilidade de soterramento. Neste caso as janelas é que apresentam um grande potencial de risco.

Os critérios utilizados, embora plenamente justificados na época em que foram adotados, apresentam hoje uma série de inconvenientes. Primeiramente devido ao emprego de materiais mais leves e com menor resistência mecânica na construção, principalmente vidro, gesso, madeira e alumínio entre outros. Em segundo lugar, o crescimento das cidades ao redor dos locais de produção e estocagem de explosivos, elevando numericamente a população sujeita aos riscos de explosão. Além desses fatores existe a atuação mais severa do ministério público dando ganho de causa a solicitações de indenizações cada vez mais elevadas.

Um exemplo desta nova condição foi o acidente da PEPCON nos EUA em 1988, mostrando que os danos causados além da distância de segurança motivaram um grande número de ações jurídicas e elevados valores de indenização.

No início do estudo sobre distância de segurança procurou-se aplicar o conceito de categoria de danos para uma explosão ocorrida em 1964 no interior da Fábrica Presidente Vargas, isto foi de grande valia, pois permitiu a identificação e classificação dos prédios danificados e posteriormente relacioná-los com a massa de explosivos. Através desse estudo verificou-se que a destruição das edificações foi gradual e de acordo com o que se esperava pela descrição de categoria de danos.

A aplicação do conceito de Wilson e Gabrielsen permitiu a elaboração de uma correlação que relacionasse distância em escala com um percentual de comprometimento de valor patrimonial de imóvel. Tal trabalho permitiu verificar e propor alterações no trabalho de Wilson e Gabrielsen, bem como estabelecer duas correlações de comprometimento de danos patrimoniais. Uma primeira para prédios de madeira e uma segunda para prédios de alvenaria. A análise do acidente de 1964 permitiu uma ilustração sobre o que pode ser esperado nas proximidades da distância de segurança. A partir disso buscaram-se correlações empíricas e de dados de explosões para verificar o que poderia ser estimado em termos de danos pessoais e patrimoniais nas proximidades das distâncias de segurança.

Uma série de testes com explosivos situados próximos a janelas foi conduzida com objetivo de esclarecer experimentalmente o risco associado a pessoas próximas a janelas.

Motivado pelo fato de que o dano mais associado ao evento de uma explosão é a quebra de vidraças, elaborou-se um esquema experimental a fim de verificar o efeito das ondas de sobrepressão sobre as mesmas.

A montagem do trabalho experimental consistiu no posicionamento de uma carga pequena de explosivo em frente a uma edificação, a uma distância variável de uma vidraça fixa em uma moldura especial. A onda de sobrepressão gerada pela carga quebrava a vidraça e arremessava os fragmentos para dentro da edificação. Após a janela havia um sistema ótico acoplado a um cronômetro, de modo que no momento em que os fragmentos atravessavam o primeiro feixe de luz o cronômetro iniciava seu funcionamento, parando o mesmo após a passagem da nuvem através do segundo feixe. Considerando a distância entre os dois feixes e o tempo decorrido estimava-se a velocidade inicial.

A nuvem de fragmentos formada atingia um painel contendo uma espuma comercial rígida de poliuretano, de modo que parte dos fragmentos ficava retido na espuma e parte a atingia e caia, deixando apenas uma deformação.

A espuma foi escolhida por possuir uma resistência constante à penetração. Esta propriedade permitiu relacionar o volume total deformado com a energia cinética dos fragmentos

As análises dos impactos revelaram os seguintes aspectos:

 Os impactos horizontais com penetração, foram aqueles em que o ângulo de incidência estava próximo de 90°. Estes se mostraram predominantes ao longo do eixo onde a carga foi posicionada. Talvez a turbulência nesta região seja tão intensa devido ao "efeito de sopro" (deslocamento de ar que se segue a sobrepressão) que os fragmentos adquiriram estabilização aerodinâmica.

209

 Impactos verticais, foram aqueles em que o fragmento atingiu formando um ângulo próximo de 0<sup>°0</sup>. Alguns impactos deste tipo foram verificados ao longo do eixo, mas não foram predominantes. Contudo, conforme ocorria afastamento da linha do eixo da carga explosiva este tipo de impacto aparecia numa distribuição aleatória com fragmentos horizontais e fragmentos inclinados.

Observou-se, que quando o escoamento de ar deslocado atravessa a janela existe próximo as bordas da janela uma região de estagnação (velocidade zero) devido a isto existe nesta região uma perda de carga bastante acentuada que cria uma região de turbulência bastante acentuada, onde não existe a estabilização aerodinâmica e por causa disto os impactos são randômicos.

Alguns impactos apresentaram uma característica singular, nesta situação alguns fragmentos que não dispunham de energia cinética suficiente para penetrar completamente na espuma receberam um impacto horizontal completando sua penetração. Ou seja, as maiores penetrações decorreram da colisão de um fragmento com outro com respectiva transferência de energia cinética. Nesta condição os fragmentos maiores e horizontais causaram as maiores penetrações.

Para este tipo de impacto usou-se a denominação de "prego-martelo" pela similaridade e necessidade de um impacto vertical seguido de um impacto horizontal.

Outra observação foi uma relação entre a velocidade inicial dos fragmentos e a espessura da vidraça, uma vez mantida as condições de massa da carga explosiva e distância da vidraça. Neste caso verificou-se que, ao reduzir-se a espessura de 6 mm para 3 mm a velocidade aumentava duas vezes.

Na prática constatou-se a transferência de quantidade de movimento da onda de sobrepressão para a vidraça mantém-se constante, de modo que quanto menor a espessura maior a velocidade dos fragmentos.

Deste modo, uma vez que a impulsão transmitida é constante, a energia cinética total da massa da vidraça aumenta com a redução da massa da mesma.

Sob esta ótica, procurou-se estabelecer critérios para distância de segurança, através do uso de correlações empíricas para fatalidade, ferimentos, quebra de janelas e ruído, buscando identificar como estes fatores poderiam afetar a população presente em diversos estabelecimentos como escolas, creches,

210

asilos, residências e shopping centers. Foram estabelecidos cenários de acidentes de modo a agrupar os estabelecimentos pelo risco envolvido ao pessoal em seu interior. Adotou-se assim uma tendência observada na Suécia de discriminação de distância de segurança. Contudo foram estabelecidos três critérios para distância de segurança ao invés de dois como na legislação Sueca.

Embora tenha sido abolida desde 1974 a redução da distância de segurança pela metade apenas pela utilização de taludes, a legislação brasileira manteve este critério até a atualidade. Com isto a legislação brasileira passou a permitir a aplicação de distâncias de segurança menores que as legislações estudadas. Assim, poderse-ia de certa forma dizer que as distâncias de segurança brasileiras estão entre as menores do Mundo.

Foi observada uma tendência da redução da distância em escala de segurança brasileira com o aumento da massa de explosivos. Tal comportamento foi analisado sob a ótica de correlações empíricas para fatalidade, ferimentos, quebra de janelas e ruído. Os resultados apresentaram um aumento significativo na probabilidade de fatalidade e de feridos com aumento da massa de explosivos, principalmente na condição de utilização de taludes com a redução de distância.

Nos valores mais elevados a probabilidade de fatalidade chega a 3% e de feridos hospitalizados ultrapassa 25%.

Uma tabela para distância de segurança para edifícios habitados foi proposta neste trabalho com base nos valores da legislação Brasileira, mantendose a distâncias de segurança para o caso sem barricadas, mas alterando-se a distância para o caso do uso de taludes com base nos fatores de correção extraídos da análise da planilha de cálculo "Blast Effects Computer v4".

É imprescindível que seja adotado no "Regulamento para fiscalização de produtos controlados" -R-105 um critério de segurança, para que sejam fixadas as distâncias de segurança, ou seja, é necessário que se defina o que se espera das distâncias de segurança com base nos princípios de quantidade de pessoal exposto, de qualidade de pessoal exposto, daí a diferenciação por tipo de estabelecimento e por custo financeiro de reparos e indenizações.

No momento a legislação brasileira carece não só de definições como não protege de forma adequada o público e o patrimônio.

Embora seja possível supor uma resistência por parte dos fabricantes e comerciantes de explosivos quanto a um aumento dos valores das distâncias de segurança é importante compreender que a utilização das distâncias atuais em áreas habitadas pode, num caso eventual de acidente, causar uma intensa destruição com elevado número de mortos e feridos. Tal cenário não ocorria no passado quando a densidade populacional próxima as áreas de risco era pequena.

Finalmente, objetivando iniciar uma discussão sobre finalidade e objetivo das distâncias de segurança foi apresentada uma tabela de distância em escala considerando a diferenciação de público e o efeito de taludes na redução da distância em escala. O ponto central da tabela é o critério adotado para definição de cada grupo de distância de segurança.

Diante da realidade brasileira propõe-se uma solução mitigadora provisória baseada no conceito de compartimentalização de material explosivo considerando a distância com talude de 305 m e as distâncias em escala estimadas para os casos de talude. Assim com base na distância de 305 metros pode-se propor o fracionamento da massa de explosivo total estocada em compartimentos protegidos capazes de evitar detonação por simpatia, ou seja, por proximidade entre cargas explosivas. Deste modo, por exemplo, uma massa de 20.000 kg poderia ser estocada em compartimentos de 5.000 kg visando manter uma distância de segurança em escala próxima a 18 m/kg<sup>1/3</sup>,

Ocorre que para satisfazer distâncias em escala de segurança maiores o número de compartimentos aumenta significativamente. No caso de 20.000 kg, precisar-se-ia de 4 compartimentos para satisfazer 18 m/kg<sup>1/3</sup>, 23 para satisfazer 32 m/kg<sup>1/3</sup> e 49 para 41 m/kg<sup>1/3</sup>. Nestes casos o número de compartimentos pode inviabilizar a solução.

No caso da explosão ocorrida no navio de transporte de metanol os danos apresentados na análise do tanque estudado apresentaram características de uma destruição incompatível com o que seria esperado para uma ignição interna considerando atrito, faísca, eletricidade estática, superfície quente ou chama. A análise do processo de aumento de pressão indicou uma taxa bastante acelerada de combustão interna, de modo que a explosão do tanque foi decorrente de outra explosão interna.

Como dentro do tanque só havia o sistema de sucção foi realizada uma análise deste, de forma que se observou que o ambiente interno deste sistema propiciava o desenvolvimento de deflagrações capazes de induzir a explosão do tanque.

Com base nas curvas de Kingery-Bulmash foi possível relacionar valores de sobrepressão com as distâncias em escala utilizadas para estabelecer as distâncias de segurança para altos explosivos.

Os valores de sobrepressão de TNT foram relacionados com o parâmetro de raio reduzido das curvas do Método Multi-energético do TNO.

Assim, utilizando o método Multi-Energético foi possível estabelecer uma equação para estimativa de distância de segurança, que são válidas para explosões com sobrepressão original variando de 0,5 atm a 10 atm.

Este trabalho pode ter prosseguimento na área civil e industrial. Por exemplo, no desenvolvimento da disposição dos equipamentos de plantas químicas (layout), a determinação de distâncias de segurança confiáveis é imprescindível, devendo-se considerar os aspectos de geração de calor e arremesso de fragmentos.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABSIL, L. H. J.; VAN DONGEN, P. and KODDE, H. H.; Inventory of Damage and Lethality Criteria for HE Explosions; TNO Prins Maurits Laboratory, Netherlands, 1998;

AMIABLE, R.V.; A six year practice in the enforcement of the new French explosive safety regulation, 22<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1986;

Ammunition and Explosives Regulations for Use by the United nations Field Missions, United Nations, September, 1998;

BIRD, R. B., STEWART, W. E. and LIGHTFOOT, E. N.; Transport Phenomena, Wiley International Edition, Singapore, 1990;

CAIN, M.R. and SHARP, D. E.; Pressure level Burst test Program: Progress paper No. 3, 25<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1992;

CROSBY, W.A.; International, Drilling, Blasting and Explosives Technology Course, Universidade de Ouro Preto, MG., 17 a 20 de Agosto de 1998;

DoD 6055.9- STD; DoD Ammunition and Explosives Safety Standards, Under Secretary of Defense for Acquisition and Technology, Washington, DC, July 1997;

ESPARZA, E. D.; The impulsive Noise Environment from small High Explosive detonations in Air, 29 DoD Explosives safety seminar, 2000;

GALBRAITH, K.; Review of blast injury data and Models, Contract Research Report 192, Health and Safety Executive, Norwich, UK, 1998; GUERKE, G. H.; Time dependent Stress and Strain Distribution, 25<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1992;

HEWKIN, D. J.; Consequences of Pressure Blast: The probability of fatality inside Buildings, ESTC Risk Assessment Study Team, DoD Explosives safety seminar, 1992;

Inquérito policial Militar da explosão da oficina de Grafitagem em 1964, Fábrica presidente Vargas, 23 de setembro de 1964;

JEFFRIES, R. M., HUNT, S. J. and GOULD, L. Derivation of fatality probability funcitions for Occupants of Buildings Subject to Blast Loads: Phases 1, 2 and 3, Contract Research Report 147, Health and Safety Executive, Norwich, UK, 1997;

KEENAN, W. A.; Shear Stress in One-Way Slabs Subjected to Blast Load, Department of Defense Explosives Safety Board, 1984;

KERSTEN, R.J.A and MAK, W. A.; Explosion hazards of Ammonium Nitrate, How to Assesss the Risks? International Symposium on Safety in Manufature, storage, Use, transport and Disposal of Hazardous materials. Tokyo, Japão, 10-20 Março de 2004;

KINNEY, G. F. and GRAHAM, K. J.; Explosives Shocks in Air, Springer, Berlin, 1985;

KUMMER, P. O., Glass Breakage and Injury- Yet Another New model? ,31<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2004;

LAHOUD, P. M., DOUTHAT, C. D. and ZEHRT, W. H.; A Risk based model for Determination of Inhabited Building Distance Siting Criteria. 29<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

216

LEÃO, D. J.; Doutrina para Operações Antibombas, Convenio NAIPPE/ USP/ ADESG, Universidade de São Paulo, São Paulo, Março de 2000;

LYMAN, O. R.; The History of the quantity distance tables for explosives safety 22<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1986;

MELCONIAN, S.; Mecânica técnica e resistência dos materiais, Livros Erica Editora Ltda, Tatuapé, São Paulo, 1993;

MENDONÇA-FILHO, G., BASTOS-NETTO and D., GUIRARDELLO, R. Effects of Orientation, Shape, Velocity and Mass of Blast Induced Window breakage fragments to Wound Trauma, 31<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2004;

MENDONÇA-FILHO, L. G., BASTOS-NETTO and D., GUIRARDELLO, R.; Estimating the TNT Equivalence of a 15 ton Single Base Powder Explosion Through the Damaged Buildings Profiles Analyses, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2002;

MERCX, W.P.M., VAN DEN BERG, A.C. and VAN LEEUWEN, D.; Application of correlations to quantify the Sourse Strenght of Vapour Cloud Explosions in Realistics Situations, Final Report for the Project: GAMES, TNO report, PML 1998-C53, Rijswijk, The Netherlands, 1998;

MERRIFIEL, R. and MORETON, P. A., An examination of the major- accident record for Explosives Manufacturing and storage in the UK. Journal of Hazardous Materials, A:63 (1998) 107-118;

MERRIFIELD, R.; Report on the Peterborough Explosion, Blast damage and injuries, 29<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

MEYER, S., LITTLE, L. and CONRATH, E., Injury Based Glass Hazard Assessment, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

MORETON, P.A. and MERRIFIELD, R. Risk Based Quantity-distances for commercial Magazines, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

MUNNS, P.A., LUONG, Y. and REW, P.J., Fire Risk Assessment for Workplaces containing Flammmable Substances, Research Report 040, Health and Safety Executive, Norwich, UK, 2002;

NFPA 68- Guide for Venting Deflagrations 2002;

NORMAN, D. L.; Methodology used for Riskwing - The UK QRA Tool, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

R-105, Regulamento para fiscalização de produtos controlados, decreto 2.665,10 novembro de 2000;

REED, J. W.; Analysis of the Accidental Explosion at PEPCON, Henderson, Nevada, on May 4, 1988, Propellants, explosives, Pyrotechnics, 17, 88-95, 1992;

REED, J. W.; Guidelines for Environmental Impact Statements on Noise, 25<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1992;

REED, J. W.; Comparison of actual Building Damage and Repair costs from the pepcon Explosion to Inhabited Building Distance Expectations, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

REED, J. W.; Injuries from the Pepcon Explosion (1998) and other incidents, 25<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1992;

REED, J.W.; Zehrt, W.H. Comparison of actual building damage and repair costs from the pepcon Explosion to inhabited building Distânce expectations. 27<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1996;

218

REES, N. J. M., Uk Mod Explosives storage principles. 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000;

REID, R. C., PRAUSNITZ and J.M., POLING, B.E.; The Properties of gases and Liquids, McGraw-Hill International editions, Fourth Edition, new York, 1988;

RICHMOND, D.R. and FLETCHER, E.R. Blast criteria for Personnel in Relation to Quantity-Distance, 20<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1982;

RICHMOND, D.R., New Airblast Criteria for Man, 22<sup>th</sup> Department of defense explosive safety Board, 1986;

SANDLER, S.I.; Chemical Engineering Thermodinamics, Segunda edição, john Wiley and Sons, New York;

SCHOMER, P. D. and WAGNER, L. RAY, Human and Community Response to Military Sounds- Part 2: Results from field-laboratory tests of sounds of small Arms, 25-mm Cannons, Helicopters and blasts, Noise Control Engineering Journal, Vol. 43, No. 1, pp. 1-13, 1995;

SCHOMER, P.D. and SIAS, J.W. A Comparative Study of Human response to Blast Noise and Sonic Booms, pp.2489-2494 Internoise 1996;

SCHOMER, P.D., SIAS, J.W. and MAGLIERI, D. A; Comparative Study of Human response, Indoors, to Blast Noise and Sonic Booms, Noise control Engineering Journal, vol. 45, No. 4 July-August, 1997;

SIGBJORN, LIAN; Quantitative Risk Assessment a integrated part of the new regulations regarding storage of explosives in Norway,30<sup>th</sup> Department of defense explosive safety Board, 2002;

SMITH, P. D. and MAYS, G. C.; Blast effects on Buildings, Thomas Telford, London, UK, 1995;

SPIVEY, K. H. and BAKER, W.; Autoclave Explosion and protection Analysis, 23<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 1988;

STAHL, M.W., WHITNEY, M.G. and SERENA, J.M., Explosive Risk and Structural Damage Assessment Code (ERASDAC), 31<sup>th</sup> Department of defense explosive safety Board, 2004;

TM 5-1300; Structures to resist the effects of accidental Explosions, Department of Army, Navy and Air Force, Washington, D. C., 1990;

VAN DEN BERG, A.C; MOS, A.L.; Research to Improbe Guidance on Separation Distance for the Multi-energy Method (RIGOS), Research Report 369, Health and Safety Executive, Norwich, UK, 2005;

VAN DER BOSH,C.J.H. and WETERINGS, R.A.P.M.; Methods for the calculation of Phisical effects, CPR 14, Committee for the prevention of disaster, Yellow Book, Third Edition, TNO Prinz Mauritz Laboratories, Holanda, 1997;

VIDAL, M., ROGERS, W.J., HOLSTE, J.C. and MANNAN M.S.; A Rewiew of estimation Methods for Flash points and Flammability Limits, Process Safety Progress, Vol 23, No.1, Wiley Interscience, march, 2004;

WEERHEIJM, J., VAN DOORMAAL, J. C. A. M., GUERKE, G., LIM, H. S.; The break-up of Ammunition magazines Failure mechanisms and debris Distribution, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2000.

WILDE, P.; Additional Validation of glass-CF Model Results for explosion Induced Window Breakage and Associated Human Consequences, 30<sup>th</sup> Department of Defense Explosives Safety Board, 2002; WILSON, W., and GABRIELSEN, B.; House Damage Assessment, Department of Defense Explosives Safety Board, 1974;

•

30<sup>th</sup> DoD Explosives Safety Seminar – DDESB Atlanta, Ga. 13-15 August, 2002

# ESTIMATING THE TNT EQUIVALENCE OF A 15 TON SINGLE BASE POWDER EXPLOSION THROUGH THE DAMAGED BUILDINGS PROFILES ANALYSES

Letivan Gonçalves de Mendonça-Filho FPV-IMBEL - Ph : 12 3156-9094 E-Mail: letvan@dglmet.com.br

Demétrio Bastos-Netto LCP - INPE - Ph: 12 560-9402 E-Mail: demetrio@cptec.inpe.br

Reginaldo Guirardello FEQ - UNICAMP - Ph: 19 3788-3955 E-Mail: guira@fec.inicamp.br

keywords: TNT Equivalent, Single Base Powder, Damage assessment

#### ABSTRACT

Back in 1964 President Vargas Works was the only place in the country which processed single base powder for the Brazilian Armed Forces. Then its industrial activity was quite strong and around 4:45AM of September 23<sup>rd</sup> an intense decomposition of nearly 15 ton of that material took place in one of the production lines workshops. The consequences of this explosion were the destruction and extensive damage to the workshops around its epicenter. At that time pictures of all affected buildings were taken and their damages fully described. This allowed the present work which consists in the evaluation of the TNT equivalent charge of the explosion using the concept of damage category developed by UK engineers based on the WWII damaging bombing data.

# Introduction

Accidents with large amounts of propellants or explosives may take place inside installations such as production lines or storage rooms or in the open, during loading operations or transportation.

The ability to evaluate possible damage in buildings and structures caused by these materials either under storage or while being transported is an essential requirement under any security procedures. Therefore it is highly desirable to be able to foresee the degrees of damages caused by this type of accident.

Back in 1964 the only facility in the country to process single base powder for the Brazilian Armed Forces was the President Vargas Works (FPV), in Piquete, a town between the cities of Rio de Janeiro and São Paulo. Then its industrial activity was pursued around the clock and around 4:45AM of September 23<sup>rd</sup> an intense decomposition of nearly 15 ton of that material took place in one of the production lines workshops.

The consequences of this explosion were the destruction and extensive damage to the workshops around its epicenter. At that time pictures of all affected buildings were taken and their damages fully described.

This allowed the present work which consists in the evaluation of the TNT equivalent charge of the explosion using the concept of damage category developed by UK engineers based on the WWII damaging bombing data [1-3].

This method, described by Merrifield and Mackenzie [1], essentially divides the damaged buildings in five categories (here increased to ten, due to the extensive damage) and allows for the establishment of a relationship between damage and distance, i.e., of the destruction profile. This technique was chosen due to the fact that it was first developed envisaging brick houses as main targets which happened to be the main construction material of the above mentioned Plant.

The mean TNT equivalent charge was calculated and compared with the TNT equivalent charge for each category, the maximum data departure being less than 10%, as expected.

Finally, this mean value, corrected to account for containing effects, yielded a 7% departure from the TNT equivalent value of the actual explosion, thus displaying the sound applicability of this technique.

#### **Model Description**

Following Merrifield and Mackenzie[1], buildings damaged by explosions can be categorized into four classes according to their damage assessment, as shown in Table 1:

	Table 1. Damage category and description (Taken non Ref. [1])
Damage	Damage Description
Category	
Α	Houses completely demolished , i.e., with over 75% of the external brickwork
В	demolished.
Сь	Houses so badly damaged that they are beyond repair and must be demolished when the opportunity arises. Property is included in this category if 50-75% of the external brickwork is destroyed, or in the case of less severe destruction, the remaining wall have gaping cracks rendering them unsafe.
Ca	Houses which are rendered uninhabitable by serious damage, needing such an extensive repair that they must be postponed until after war. Example of damage resulting in such conditions include partial or total collapse of roof structures, partial demolition of one or two external walls up to 25 % of whole , and severe damage of load-bearing partitions necessitating demolition and replacement.
D	Houses that are rendered uninhabitable, but can be repaired reasonably quickly even under war time conditions, the damage sustained not exceeding minor structural damage, and partitions and joinery wrench from fixings.
	Houses requiring repairs to remedy serious inconveniences, but remaining habitable. Houses in this category may have sustained damage to ceilings and tilling, battens and roof covering, and minor fragment effects on wall and window glazing. Cases in which the only damage amounts to broken glass in less than 10 % of the windows are not included

Table 1 : Damage category and description ( Taken from Ref.[1] )

They also suggested that the relation between W [kg], the explosive mass, and  $R_i$  [m], the distance from the explosion epicenter as related to the specific damage category, i, to be given by:

$$R_{i} = \frac{k_{i}W^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{3175}{W}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{6}}}$$
(1)

Where  $k_i = 4.8$ , 7.1, 12.4, 21.3 and 42.6 for categories A, B, Cb, Ca and D, respectively.

As already mentioned, this technique was first developed to describe the damage caused to brick houses typical of the U.K. during WWII. This was quite convenient here in

this work, for most of the Facility buildings at the time of the accident were made of the same material.

### Model upgrading

The damaged buildings detailed description available in reference [4] were contained within a radius of nearly 1,500 meters from the explosion epicenter, so that a pattern showing "the destruction profile" could be established. This allowed the damage to be assessed through some relevant structural aspects. In this work it has been decided to choose the brickwork and the roof as the relevant aspects to be taken into consideration. This procedure led the brickwork and roof damages to be graded into three and six classes respectively, each one ordained from the more severe to the lightest damage. More than 200 pictures were studied and some of them are shown in Annex 1. This allowed the establishing of the following classification:

Brickwork:

- a) Complete Demolition : At least one wall has crashed. (e.g. Figs. 1-4, Annex 1)
- b) Partial demolition: At least one wall shows severe cracks and crashing is imminent of follow. (e.g.: Fig. 5, Annex 1)
- c) Gaping cracks: At least one wall shows cracks not too severe to need demolition. (e.g. Figs. 8 and 9, Annex 1)

Roof:

- a. Total collapse. (e.g. Fig. 5-7, Annex 1)
- b. Partial collapse. (e.g. Fig. 9, Annex 1)
- c. Tiles (ceramic) pulled out: The roof structure remains but some tiles are pulled out. (e.g. Fig.10, Annex 1)
- d. Tiles (ceramic) displaced: No tiles were pulled out.(e.g. Fig. 11, Annex 1)
- e. Tiles (ceramic) with cracks: Small pieces of tiles were found inside the buildings (e.g. Fig11, Annex 1)
- f. Tiles (Asbestos) displaced: Asbestos tiles were displaced even if no damage were noticed in tiles (ceramic). (e.g. Fig 12, Annex 1).

The above considerations led to Table 2 shown below:

Damage Category	Brickwor k demolished	Partial demolíti	Gaping cracks	Complet e Roof	Partial Roof	Tiles pulled	Tiles (ceramic	Cracked Tiles (ceramic	Tiles (Asbesto s)
A	X			X					
В	X			X					
Cb		X	X	X	X				
Ca						X	X		
D						_		X	X

Table 2 : Suggested Categories for Damage Description

Therefore, as many buildings sustained extensive damage so that a large number of samples was available, it has been decided to split each damage category described above into two new ones: One including the worst kind of damage within the category under consideration and the other including the lighter kind of damage pertaining that category. Table 3 summarizes this suggestion:

Damage Category	Brickwor k demolished	Partial demoliti	Gaping cracks	Total collapse of Roof	Partial collapse of R cof	Tiles pulled	Tiles displaced	Tiles With	Asbestos displaced
A (high)	X(100%)			X					:
A (low)	X(75%			X					
B (high)	X (50%)			X					
B (low)	X (25%)			Х					
Cb (high)		X		X				······································	
Cb (low)			X		X				
Ca (high)						X			
Ca (low)							X		
D (high)								Х	
D (low)									X

Table 3 : Expanded Damage Categories

Table 3, along with pictures taken immediately after the occurrence and detailed damage description led to the assembling of Table 4. As already mentioned, some of the photographs used in this work are displayed in Annex 1 (taken from Ref.[4])

a) 5	e F	ų		ۍ آ	of	ed		ų	ŝ	<u> </u>		
stanc	:kwo olish	artial	aping acks	otal apse	artial apse	lluq 8	iles	ss wii acks	besto Tiles	mag	ligh	MO
Dis Dis	Brid	P <sub>i</sub> dem	55	Collo	Colls	Tiles	Ľ	Tile	Asi T	C Da		
		<u> </u>	<u> </u>	v		·		<u> </u>		D		v
00	<u>A</u>		ļ	<u> </u>				<u> </u>		В		
80				X						В	X	
110	X			X						В		X
140		X		X						Cb	X	
170		X		X						Cb	X	
180			X		X					Cb		X
190			X		X					Cb		X
240						X				Ca	X	
270						X				Ca	X	
340			-				X			Ca		X
370							X			Ca		X
410								X		D	X	
740									Х	D		X

Table 4: Damage Sustained - Distance Assessment

Notice that no Damage Category A was found in this assessment.

The limits between adjoining categories were established taking the mean between the low end of one category and the high end of the next, exception made to the last one (i.e., category D), where it was chosen its low value.

This way the category limits came out as: 125 m, 215 m, 390 m and 740 m for Categories B, Cb, Ca and D, respectively.

A partial TNT equivalent charge,  $\overline{W}_o$ , is then calculated choosing the ratio  $\frac{R_i}{k_i}$  as given by Equation (1) to be the mean value among the several existing categories. For N

given by Equation (1) to be the mean value among the several existing categories. For N existing categories (Here N = 4, namely, B, Cb, Ca and D) this yields:

$$\frac{k_i \overline{W_o^3}}{\left[1 + \left(\frac{3175}{\overline{W_o}}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{k_i}$$

(2)

Choosing  $R_i$  to be the distance from the explosion epicenter corresponding to each damage category as estimated in Table 3 and the parameters  $k_i$  of damage category i ( $k_i = 7.1, 12.4, 21.3$  and 42.6 for categories B, Cb, Ca and D, respectively) as mentioned earlier, Equation (2) yields this TNT equivalent,  $\overline{W_o} = 6,186.74$  kg.

Table 5 compares the above with the results for the TNT equivalent obtained for each damage category using Equation (1) and displays their relative errors with respect to  $\overline{W}_{a}$ .

Damage Category	R <sub>i</sub> (Meters)	W <sub>i</sub> (TNT equivalent)	$\frac{\overline{W_i} - \overline{W_o}}{\overline{W_o}} x 100$
В	125	6142.83	-0,71
Cb	215	5915.83	-4,37
Ca	390	6778.41	9,53
D	740	5942.80	-3,94

Table 5 : Comparison between  $\overline{W}_{o}$  and the TNT equivalent of each damage category

However, it is well known that one does not recover all energy potentially available from the explosive. For TNT, the total energy available from the its detonation (calculated from thermodynamic work function) is 1159 cal/g. This energy is split between the air blast and other work performed by the explosion.

Assuming that most of bombing over UK during WWII was done with fragmentation bombs then, by following the same reasoning done by Cooper [5], who cleverly discussed the explosive energy budget using as an example a cylinder of TNT encased in steel with M/C = 1 (i.e., the mass of steel, M, equal to the mass of the explosive charge, C). He showed that, from that initial value of ~1160cal/g only 660 cal/g was available to form the air blast wave (the remaining ~500 cal/g having been spent on the expansion and fragmentation of the steel case). Therefore the TNT equivalent,  $\overline{W}_o$ , obtained from Equation (2) should be corrected by a factor K, so that the effective TNT equivalent,  $\overline{W}$ , will then be given by

$$\overline{W} = K \overline{W_a} \tag{3}$$

From the above discussion K can be taken to be equal to K = 1159/660 = 1.76 This yields  $\overline{W} = 1.76 \text{ x } 6,186.74 = 10,888.66 \text{ kg}$ , i.e.,

$$\overline{W} = 10,888.66 \text{ kg}$$
 (4)

for the TNT equivalent.

#### Conclusions

The single base powder total energy available was 921.0 cal/g (data taken from calorimetric measurements). For the total mass of 14,740 kg which underwent explosion, one can calculate its TNT equivalent to be  $17,740.0 \ge (921.0/1159.0) = 11,713.15 \text{ kg}$ .

Equation (4) compared with the above figure, yields a departure of 7 %. Obviously this is due to unaccounted energy absorbing phenomena such as cratering. The crater mean diameter was 28.30m according to Reference [4]. However, it seems that the measurement

was taken relative to the apparent crater diameter not to the actual one. Incidentally, a crater diameter of 23.86m yields a TNT equivalent of 848.86 kg (using Yallop's equation as given in Reference [6]) which happens to be the precise difference between the estimated value using the present technique [Equation (4)] and the TNT equivalent of the actual exploding mass of Single Base Powder.

Therefore the use of the concept of damage category established by the U.K. engineers to assess the bombing effects during WWII led to satisfactory results in the present case.

#### 5. Acknowledgements

The authors are indebted to Major Jim Mackenzie of UK-DERA and Dr. Roy Merrifield of UK-Health and Safety for their valuable assistance. They would like to thank Presidente Vargas Works (IMBEL) through its Superintendent, Cel. Vagner P. Carinni and the Brazilian Army and for their support. One of the authors (Bastos-Netto) acknowledges the further support provided by INPE and by CNPq (Brazilian National Research Council) through Grant No. 500140/92-8(NV)

#### 6. References

- 1. Merrifield, R. and MacKenzie, J.F., "Methodology for estimating the Explosion Yield of Incidents Involving Conventional or Improvised Explosives", Proceedings, 8<sup>th</sup> International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, McLean VA, April 1997.
- 2. Absil, L.H.J., van Dongen, Ph. And Kodde, H.H., "Inventory of Damage and Lethality Criteria for HE Explosives", TNO Report, PML 1998-C21, ,Prins Mauritz Laboratory, Netherlands 1998.
- 3. Mays, G.C. and Smith P.D., Blast Effects on Buildings, Thomas Telford Ed., Trownbridge, U.K., 1995
- 4. Brazilian Army, "Accident Investigation Report (in Portuguese)" Rept No. 700/64, Piquete, São Paulo, Sept. 19,1964
- 5. Cooper, P.W. "Explosives Engineering", Wiley-VCH Ed., New York, 1996
- Merrifield, R. and MacKenzie, J.F., "The UK-Australian 40 tonne Donor/Receptor Trial – Sept 1999. Receptor Damage – What caused it? Preliminary Observations", Proceedings, DDESB Explosive Safety Seminar, New Orleans, Mo., July 2000.

Annex 1







231

Fig 1: 50 meters from epicenter Fig 2: 80 meters from epicenter Fig 3: 80 meters from epicenter



Fig 4: 110 meters from epicenter





Fig 5: 140 meters from epicenter Fig 6: 170 meters from epicenter



Fig 7: 170 meters from epicenter



Fig 8: 180 meters from epicenter



Fig 9: 190 meters from epicenter



Fig 10: 240 meters from epicenter



Fig 11: 270 meters from epicenter Fig 12: 340 meters from epicenter



31<sup>th</sup> DoD Explosives Safety Seminar – DDESB San Antonio, TX . 24-26 August 2004.

# EFFECTS OF ORIENTATION, SHAPE, VELOCITY AND MASS OF BLAST INDUCED WINDOW BREAKAGE FRAGMENTS TO WOUND TRAUMA.

Letivan Gonçalves de Mendonça-Filho FPV-IMBEL - *Ph* : 55 12 3156-9094 E-Mail: letivan.fpv @imbel.com.br

Demétrio Bastos-Netto LCP - INPE - *Ph: 55 12 560-9402* E-Mail: demetrio@cptec.inpe.br

Reginaldo Guirardello FEQ - UNICAMP - Ph: 55 19 3788-3955 E-Mail: guira @feq.unicamp.br

# keywords: glass fragments, glass shards, wound trauma

## ABSTRACT

The most frequent damage associated to a blast explosion event is the window breakage, for the glasses commonly used there usually are so sensitive to low level load pressures that a small charge of explosive can generate window breakage in a broad area.

Also associated human consequences such as injuries and fatalities are related to aspects such as glazing fragment sizes and shapes, thrown distances, propelled impact and number of fragments per unit area. Although many of these aspects have already been extensively studied there is relatively little information on the effects caused to wound trauma. Many relevant information related to the effect of fragments in producing skin penetration and laceration still need deeper investigation. This work deals with aspects of the penetration potential of glass fragments. The experimental setup consists of an explosive charge placed in front of a building where a glass window panel is positioned along the axis of the explosive charge. The generated blast wave loads the glass window breaking it in several fragments. Behind the window there is an optical system to assist the evaluation of the cloud fragments mean velocity along with a special foam that collects and "freezes" some of those fragments. This allows the identification of aspects such as the orientation, shape, velocity, and mass of the fragments as compared to the frequency of deep penetration. In this testing procedure the effects of the standoff distance and of the type and dimensions of the glass panels are also investigated.

Distribution Statement A: Approved for public release, distribution is unlimited.

### Introduction

When an explosive charge detonates, it generates a shock wave that moves thorough it. This wave eventually reaches the interface between the explosive material and the surroundings, usually air.[1,2] At this point, the energy developed by the explosion transfers to the air, compressing it and pushing it outwards from the center of the blast, creating a pressure pulse. Along with the fragments produced by the explosive charge, this pressure pulse plays a predominant role in the damage imparted by the explosive. Behind the zone of compressed air a rarefied region is established, so that a low pressure zone is associated with the pressure pulse. This air-blast system is illustrated in figure 1.



Distance

Figure 1 : Illustrative example of the air-blast system [1]

The most frequent damage associated to a blast explosion event is the window breakage,[3] for the glasses commonly used in this manner usually are so sensitive to low level load pressures that a small charge of explosive can generate window breakage in a broad area.



Figure 2 : Window breakage due over pressure effects. [3]

Also associated human consequences such as injuries and fatalities are related to aspects such as glazing fragment sizes and shapes, thrown distances, propelled impact and number of fragments per unit area.[2,3,4] Although many of these aspects have already been extensively studied there is relatively little information on the effects caused by wound trauma. Many relevant information related to the effect of fragments in producing skin penetration and laceration still need deeper investigation [2,3]. This work deals with aspects of the penetration potential of glass fragments.

#### **Experimental Setup**

The experimental setup consisted of an explosive charge placed in front of a building where a glass window panel is positioned along the axis of the explosive charge as shown in Figure3. The generated blast wave loads the glass window breaking it into many fragments. Behind the window there is an optical system (Figure 4) to assist the evaluation of the cloud of fragments speed along with a special foam that collects and "freezes" some of those fragments (Figure 5). This allows the identification of aspects such as the orientation, shape, velocity, and mass of the fragments as compared to the frequency of deep penetration. In this test procedure the effects of the standoff distance and of the type and dimensions of the glass panels are also investigated.



Figure 3 : View of an explosive charge positioned in front of the window



Figure 4 : Views of optical system and Chronometer



Figure 5 : View of foam panel fixed on a wood support



Figure 6 : General view including optical system, foam , wood support and chronometer.

٠



### **Problem Description:**

It is possible to describe the phenomena taking place from the arrival of the blast wave on the window up to the final deformed foam through the following steps:

- 1. Glass breakage of the window due to the action of the overpressure .
- 2. Acceleration of the glass fragments by overpressure action.
- 3. Interaction of the blast wind with glass fragments.
- 4. Impact of the glass fragments on the foam.

The impacts can be summarized at the following categories:

- 1. Horizontal impact with penetration, the fragment possessing an arrival angle of incidence of nearly 90°.
- 2. Vertical impact or flat surface impact, the fragment possessing an arrival angle of incidence of nearly 180°.
- 3. Angular impact with penetration, the fragment possessing an arrival angle of incidence of nearly 45°.
- 4. Accentuated impact, the fragment first performing first an angular or horizontal impact then receiving a flat or vertical impact from another incoming fragment which will accentuate its penetration. In several cases it were found many small fragments imbedded deep in the craters of the large ones.



Figure 7: The hypothesis of aerodynamic stabilization.

236

The first category of impact was found predominant along the axis where the charge was positioned. Maybe this is because the turbulence at this region is so intense due to the blast wind that the glass fragments tend to acquire aerodynamic stabilization.

Category 2 was found also along the axis where the charge was positioned but there it was not predominant. Far from the center of impacts, this category distribution seemed random, the distribution of this category was completely random with the categories 1 and 3. This behavior might be associated with the rotation of the fragments which can be more pronounced where the stabilization effects of the blast wind are less effective.

Category 3 was found to follow the tendency of category 2, for the same reasons.

Category 4 is singular. At this particular situation, slower fragments, which do not have enough energy to achieve a complete penetration in the foam, undergo a horizontal impact on the foam and then a larger fragment impacts over it, giving it the needed energy to perform a complete penetration in the foam, just like a "nail and hammer" action.

Finally Figure 8 displays two views of the foam panel with imbedded fragments of those categories





Figure 8 : Views of the foam panel with imbedded fragments

### **Penetration Model**

This foam was chosen due to its constant compression pressure response,  $P_C$ , which allows to relate its total deformation volume to the kinetic energy,  $E_C$ , of the fragments. Hence the deformation work,  $W_{DW}$ , can be written as :

$$W_{DW} = \Delta E_{C} = \int_{0}^{x} [P_{C} \cdot A] \cdot dx$$
$$W_{DW} = P_{C} \int_{0}^{x} A \cdot dx \qquad \text{(if } P_{C} = \text{constant)}$$
$$W_{DW} = P_{C} \cdot V$$
$$P_{C} = \frac{W_{DW}}{V} = \frac{\Delta Ec}{V}$$

where A is the fragment generated deformation cross section area and V, its volume.

 $P_C$  was estimated by dropping a metallic body with known dimensions and weight from known different heights on the foam surface. These measurements along with the above mentioned assumptions yielded the graph shown in Figure 9 which displays the compression pressure with the penetration depth in the foam. It can be seen that the compression pressure is nearly constant and may be taken to be equal to 0.132 J/cm<sup>3</sup> up to a depth of 4.5 cm.



Figure 9: Foam compression pressure versus penetration depth

The knowledge of the weight of the retained fragments in the foam along with their respective penetration volume allowed the comparison of the mass of fragments with their total kinetic energy, as shown in Figure 10, for an initial mean velocity of 63 m/s and fragment capture 2 meter away from the glass panel with a mean arrival velocity of 9.5 m/s. The explosive charge consisted of 0.3 kg of cast TNT placed 0.45 m away from the window, as suggested in Figure 3. Figure 11 displays the behavior of the fragment flight for an initial mean velocity of 349 m/s and fragment capture 2 meter away from the glass panel with a mean arrival velocity of 0.9 kg of cast TNT placed 1 m away from the of window, as suggested in Figure 3.



Figure 10 : Fragment weight versus kinetic energy, for a 6 mm thick glass panel



Figure 11: Fragment weight versus kinetic energy, for a 3 mm thick glass panel

The impact velocity can also be estimated (from fragments kinetic energy and mass considerations), yielding the graphs shown in figures 12 and 13 for the geometry and charge positioning described above for figures 10 and 11 respectively



Figure 12: Fragment weight versus impact velocity, for a 6 mm thick glass panel


Figure 13: Fragment weight versus impact velocity, for a 3 mm thick glass panel

The spreading noticed on the velocity distribution graphs are due to the drag forces acting on fragments of different shape and flying attack angle and possibly to impacts among flying fragments which might even act as in a hammer like effect pushing early arriving fragments deeper into the foam. Notice also that light fragments which penetrated the foam were found inside craters of larger fragments.

## **Conclusions:**

The experimental setup consisted of an explosive charge placed in front of a building where a glass window panel was positioned normal to the axis of the explosive charge. The generated blast wave loaded the glass window breaking it in many fragments. Behind the window there was an optical system to assist the evaluation of the cloud fragments speed along with a special foam that collected and "froze" several of those fragments.

The impacts displayed the following behavior:

Horizontal impacts with penetration were found predominantly along the axis where the charge was positioned. This might be because the airflow in this region was so intense due to the blast wind that the glass fragments acquired aerodynamic stabilization.

Vertical impacts or flat impacts were found also along the axis where the charge was placed but it was not predominant there. Far from the center of the impacts, the distribution of this category seemed to be completely random. This behavior can be associated with the spinning of the fragments which can be more pronounced where the stabilization effects of the blast wind are less effective.

A kind of accentuated impact was noticed where the fragment first perform a horizontal or angular impact, then receives a flat or vertical impact accentuating its penetration. In many instances it were found little fragments imbedded deeper at the crater of large ones. It seems that at this particular situation the smaller fragments, which do not have enough energy to attain a complete penetration in the foam, perform a horizontal impact on the foam surface, then a larger fragment impact gives it the push (i.e., the energy) needed to achieve a complete penetration in the foam, seemly in a "nail and hammer" fashion.

The foam was chosen due to its constant compression pressure response which could be related to its total deformation volume and to the kinetic energy of the fragments.

Knowing the weight of the foam trapped fragments and their respective penetration volumes it was possible to relate the mass of the fragments with their total kinetic energy. Then the impact velocity was estimated from the fragments kinetic energy and mass.

The spreading noticed on the velocity distribution graphs are due to the drag forces acting on fragments of different shape and flying attack angle and possibly to impacts among flying fragments which might even act as in a hammer like effect pushing early arriving fragments deeper into the foam. Notice also that light fragments which penetrated the foam were found inside craters of larger fragments.

## Acknowledgements

The authors are indebted to Presidente Vargas Works (IMBEL) through its Superintendent, Cel. Vagner P. Carinni and its instrumentation engineer, Mr. M. Aquino and the Brazilian Army for their support. One of the authors (Bastos-Netto) acknowledges the further support provided by INPE and by CNPq (Brazilian National Research Council) through Grant No. 500140/92-8(NV)

## **References:**

1. Yeager, Kirk., "Investigator Bulletin 99-2", FBI Bomb Data Center, 1999 .

2. Absil, L.H.J., van Dongen, Ph. and Kodde, H.H., "Inventory of Damage and Lethality Criteria for HE Explosives", TNO Report, PML 1998-C21, Prinz Mauritz Laboratory, Netherlands 1998.

3. Mays, G.C. and Smith, P.D., Blast Effects on Buildings, Thomas Telford Ed., Trownbridge, U.K., 1995.

4. Cooper, P.W. "Explosives Engineering", Wiley-VCH Ed., New York, 1996