

ANÁLISE DE RISCO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS

O Transporte de Mercadorias Perigosas

TIAGO PEREIRA ALENCOÃO MARQUES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor António Fidalgo do Couto

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

*Não sou nada.
Nunca serei nada.
Não posso querer ser nada.
À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo.*

Álvaro de Campos

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao meu orientador, Professor António Fidalgo do Couto, pela sua inesgotável capacidade de trabalho e incansável dedicação à compreensão dos múltiplos e diversificados fenómenos com que nos deparámos ao longo da elaboração deste trabalho. O seu conhecimento e cultura científica são um valor inestimável para a composição da presente dissertação e para a minha formação como pessoa. Pela sua ajuda, amizade e por, desde sempre, ter acreditado em mim, quero expressar a minha mais sincera gratidão.

Aos restantes Professores da secção de Vias de Comunicação, pela prontidão em aceder a todas as minhas solicitações.

Aos meus pais, pelo suporte e força dados em todos os momentos.

À minha irmã, Inês, pela descontração induzida na minha forma de trabalhar.

Aos meus amigos que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Após alguns acontecimentos desastrosos ocorridos em túneis rodoviários, a consciencialização geral para a necessidade de se aprofundarem conhecimentos e processos relativos à gestão de riscos de baixa probabilidade e graves consequências, foi evidente. Das diversas iniciativas legais e grupos de investigação formados para estudar as várias vertentes do problema, pode retirar-se um denominador comum que constitui a ferramenta base de todo o processo: a Análise de Risco.

O transporte de mercadorias perigosas constitui uma especificidade muito relevante dentro desta lógica de segurança em túneis. De facto, os evidentes acréscimos de risco associados ao transporte destas mercadorias através dos túneis conduzem a que este seja um tema objecto de uma crescente preocupação. Porém, não é líquido que a melhor decisão a tomar para controlar esse risco seja a proibição unilateral de passagem de veículos pesados de mercadorias que transportem mercadorias perigosas. Nesse sentido, o estudo foi orientado para o uso da ferramenta de cálculo DG QRAM, que permite estudar não só estes riscos mas também os de incêndio, não directamente relacionados com as matérias perigosas. Constitui, portanto, uma potente ferramenta de apoio ao projecto e/ou gestão de túneis rodoviários, da qual se realizou um detalhado estudo das metodologias de modelação que segue para compreender os processos subjacentes à consideração de diferentes cenários de acidente, aos quais está associada uma probabilidade de ocorrência calculada, um leque de efeitos possíveis e uma gama de consequências estimada.

Com base nessa ferramenta foi desenvolvida uma análise de risco de um túnel idealizado para o efeito, embora com base em dados reais. Problematicizou-se o método de introdução de dados e optou-se por uma alternativa que potencia a obtenção de resultados mais fiáveis, tendo sido desenvolvida paralelamente uma folha de cálculo sistematizada para o efeito. Este estudo centrou-se na análise de quais os cenários potencialmente mais perigosos que podem ocorrer num túnel e os factores mais sensíveis do seu sistema de segurança, dados determinantes para conhecer as áreas onde é prioritário actuar e através de que meios/medidas com vista a reduzir, efectivamente, o risco associado ao uso do túnel.

Foram testadas estratégias de intervenção sob o ponto de vista da sua adequabilidade e eficácia de resultados, nomeadamente intervindo ao nível da ventilação e das portas de emergência do túnel. Tal permitiu que conclusões importantes fossem retiradas quanto à compreensão e controlo dos principais fenómenos associados a acidentes em túneis, sobretudo ao nível das estratégias para evitar a sua ocorrência e para mitigar os seus efeitos. Concluiu-se ainda que as características específicas de cada túnel são determinantes na qualidade dos resultados obtidos e que o modelo de análise utilizado apresenta algumas limitações relevantes que a podem influenciar.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis Rodoviários, Análise de Risco, Mercadorias Perigosas, Incêndios, QRAM.

ABSTRACT

After some disastrous happenings occurred in road tunnels around the globe, a general conscience raised for the necessity of deepen the knowledge and processes related to the management of low probability- great consequences risks. From the variety of legal initiatives and investigation groups formed to study all the sources of the problem, one common denominator, which constitutes the base of all the process, can be identified: Risk Analysis.

The transport of dangerous goods assumes a very relevant particularity among this logic of road tunnel safety. In fact, the evident boost of risk generated by the transport of this kind of material through tunnels lead to make this issue an object of increasing concern. Nevertheless, it is not obvious that the best decision to take in order to control the risk would be the unilateral prohibition of heavy good vehicles carrying dangerous goods to pass along the tunnels. Thus, this research work was oriented to the usage of the DG QRAM calculation tool, which allows the consideration not only of those risks, but also the fire risks not directly associated to dangerous goods. Therefore, this reveals to be a powerful tool in supporting the design and/or management of road tunnels, over which a detailed study of the followed modelling methodologies has been made with the purpose of comprehend the processes that lead to the consideration of different accident scenarios, each scenario with a probability of occurrence, a sort of possible effects, and a range of estimated consequences.

Based on this tool, a risk analysis over an idealized tunnel has been developed. The input data method has been discussed and a choice for an alternative that potentiates the attainment of more feasible results has been taken. With that purpose a parallel generic systematized spreadsheet was built. That study focused the analysis of the scenarios potentially leading to hazardous situations and the most sensible factors of the safety system, aiming to identify the areas where a priority intervention is demanded and in which way/with which measures shall it be done. The general objective is to effectively reduce the risk connected to the usage of the tunnel.

Different intervention strategies were tested by the feasibility and effectiveness point of view, more precisely acting over the ventilation system and the emergency exist of the tunnel. This lead to important conclusions about the understanding and control of the main phenomena linked to tunnel accidents, principally concerning the strategy to avoid the occurrence and to mitigate its effects. It has also been concluded that the specific characteristics of the tunnel are determining for the quality of results and that the model used shows some relevant limitations that can influence it.

KEYWORDS: Road Tunnels, Risk Analysis, Dangerous Goods, Fire Safety, QRAM.

ÍNDICE GERAL	i
AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1. O ESTADO DA ARTE. EQUADRAMENTO SOCIAL E LEGAL DO PROBLEMA	1
1.1. NOTA INTRODUTÓRIA	1
1.2. ENQUADRAMENTO SOCIAL E LEGAL	2
1.2.1. PRINCIPAIS GRUPOS DE INVESTIGAÇÃO	3
1.2.2. A DIRECTIVA EUROPEIA SOBRE SEGURANÇA EM TÚNEIS	5
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2. A ANÁLISE DE RISCO. ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO DO PROBLEMA	9
2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS E CONCEITOS GERAIS	9
2.2. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO	12
2.3. A APLICAÇÃO PRÁTICA EM CADA FASE DO PROCESSO. MÉTODOS A USAR	15
2.3.1. CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DE RISCO	19
2.3.1.1. Critério de aceitabilidade para o risco individual	21
2.3.1.2. Critério de aceitabilidade para o risco social	23
2.3.1.3. Critério para o risco economicamente aceitável	25
2.3.1.4. Apresentação do critério de avaliação “Knock-Out Criteria – Euro TAP”	27
3. O TRANSPORTE DE MATERIAIS PERIGOSOS EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS	31
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	32
3.2.1. ESTUDO SOBRE ACIDENTES EM TÚNEIS COM GRANDES INCÊNDIOS	32
3.2.2. ESTUDO SOBRE O ESTADO DA LEGISLAÇÃO	34
3.3. CLASSIFICAÇÃO E TIPIIFICAÇÃO DE MERCADORIAS PERIGOSAS	35

3.4. CLASSIFICAÇÃO HARMONIZADA DE TÚNEIS QUANTO ÀS RESTRIÇÕES DE CIRCULAÇÃO DE PRODUTOS PERIGOSOS	37
3.4.1. BASES DO SISTEMA PROPOSTO E SUA DESCRIÇÃO	38
3.5. O MODELO QUANTITATIVO DE AVALIAÇÃO DE RISCO – QRAM	39
3.5.1. ESCOLHA DE MATÉRIAS PERIGOSAS E CENÁRIOS A ESTUDAR	41
3.5.1.1. HGV sem mercadorias perigosas	42
3.5.1.2. GPL transportado em cilindros de pequena dimensão	42
3.5.1.3. Grandes volumes de combustível líquido transportado em cisterna	44
3.5.1.4. Cloro transportado em cisterna	45
3.5.1.5. GPL transportado em cisterna	46
3.5.1.6. Amoníaco transportado em cisterna	47
3.5.1.7. Transporte de acroleína	47
3.5.1.8. Transporte de dióxido de carbono líquido e refrigerado	47
3.5.1.9. Reflexões sobre leque de cenários considerado	47
3.5.2. CÁLCULO DAS PROBABILIDADES DE FALHA	50
3.5.3. PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS FÍSICAS E FISIOLÓGICAS	53
3.5.4. MODELAÇÃO DE CENÁRIOS E AVALIAÇÃO DE CONSEQUÊNCIAS EM TÚNEIS	57
3.5.4.1. Incêndio e Fumo	59
3.5.4.2. Nuvens de vapor tóxico	63
3.5.4.3. BLEVE de GPL	64
3.5.4.4. VCE de GPL e combustível líquido	65
3.5.5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE EVACUAÇÃO E SISTEMA DE VENTILAÇÃO	65
3.5.5.1. Evacuação em túneis	66
3.5.5.2. Sistema de Ventilação	67

4. CASO DE ESTUDO. APLICAÇÃO PRÁTICA DO DG QRAM

	71
4.1. NOTAS INICIAIS	71
4.2. ORGANIZAÇÃO E INTRODUÇÃO DOS DADOS	72
4.2.1. DADOS DE BASE	72
4.2.2. CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL	72
4.2.2.1. Características geométricas	73
4.2.2.2. Ventilação e drenagem	75

4.2.2.3. Segurança e estrutura.....	76
4.2.3. CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO.....	76
4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS. CASO BASE.....	78
4.4. INTRODUÇÃO DE MEDIDAS REDUTORAS DE RISCO. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	82
4.4.1. APRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS REDUTORAS.....	82
4.4.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	84
4.4.2.1. Caso 1.....	85
4.4.2.2. Caso 2.....	86
4.4.2.3. Caso 3.....	87
4.4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	88

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....91

BIBLIOGRAFIA.....93

ANEXO A – OS MAIORES TÚNEIS DO MUNDO.....	95
ANEXO B – FACTORES CONDICIONANTES DA SEGURANÇA NUM TÚNEL.....	98
ANEXO C – RÓTULOS DE MATÉRIAS PERIGOSAS (DESTINADOS AO TRANSPORTE).....	99
ANEXO D – MODELO TUNPRIM.....	100
ANEXO E – MODELO UNIVERSIDADE DE LUND (SUÉCIA).....	101
ANEXO F – MODELO TUSI (NORUEGA).....	102
ANEXO G – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS ESTUDADOS.....	103
ANEXO H – PARÂMETROS DO MODELO DE CÁLCULO DO TEMPO DE EVACUAÇÃO.....	104
ANEXO I – CARACTERÍSTICAS DA SECÇÃO 1 DA DIRECÇÃO A.....	105
ANEXO J – CURVA F-N COM TODOS OS CENÁRIOS PARA O CASO 1.....	107
ANEXO K – CURVA F-N COM TODOS OS CENÁRIOS PARA O CASO 2.....	108
ANEXO L – CURVA F-N COM TODOS OS CENÁRIOS PARA O CASO 3.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 – Principais projectos Europeus de investigação e seu relacionamento.....	4
Fig.1.2 – Túneis sob o âmbito da Directiva 2004/54/CE.....	6
Fig.2.1 – Abordagem holística da segurança em túneis rodoviários	10
Fig.2.2 – Esquema representativo do processo de avaliação de risco]	11
Fig.2.3 – Esquematização do conceito dos métodos qualitativos (cenário)	12
Fig.2.4 – Esquematização do conceito dos métodos quantitativos (sistema).....	13
Fig.2.5 – Abordagens probabilística e determinística numa escala probabilidade - consequência	13
Fig.2.6 – O <i>bow tie model</i> aplicado a acidentes com fumo e fogo	17
Fig.2.7 – Risco Social	20
Fig.2.8 – Esquematização da teoria de tolerabilidade do risco.....	21
Fig.2.9 – Relação entre as propriedades intervenientes na definição dos limites de aceitabilidade do risco individual	22
Fig.2.10 - Exemplo de curva F-N.....	23
Fig.2.11 – Diferentes limites sugeridos na literatura para o Risco Social	24
Fig.2.12 – Relação entre investimento em medidas de segurança e o nível de risco resultante	27
Fig.2.13 – Gráfico para determinação do factor de bonificação	29
Fig.3.1 – Esquematização do conceito do BLEVE (descompressão, ebulição e explosão)	38
Fig.3.2 – Árvore de falhas para o cenário de HGV sem DG.....	42
Fig.3.3 – Árvore de falhas para o cenário de BLEVE de cilindros de 50Kg	43
Fig.3.4 – Árvore de falhas para o cenário de ignição de uma poça de combustível.....	44
Fig.3.5 – Árvore de falhas para o cenário de VCE de uma atmosfera inflamável gerada por uma poça	45
Fig.3.6 – Árvore de falhas para o cenário de transporte de cloro em cisternas	46
Fig.3.7 – Esquema explicativo das definições de Eventos, Acidente e Incidente adoptadas pelo modelo	51
Fig.3.8 – Esquema da repartição dos diferentes tipos de eventos e acidentes	52
Fig.3.9 – Exemplo de evolução das percentagens de mortos e feridos com a distância	56
Fig.3.10 – Componentes da poluição ambiental consideradas para a análise no modelo.....	57
Fig.3.11 – Esquema das relações presentes no processo de análise de espalhamento da poça	60
Fig.3.12 – Ilustração da simplificação relativa ao incêndio instantâneo.....	60
Fig.3.13 – Esquema do procedimento seguido para a definição da relação Calor x Distância, segundo o FNAP	61
Fig.3.14 – Regimes de espalhamento dos fumos	62
Fig.3.15 – Esquema de modelação do sistema de ventilação.....	69
Fig.4.1 – Seccionamento tipo de um túnel com dupla galeria	73

Fig.4.2 – Seccionamento tipo de um túnel com galeria simples numa direcção e aberto na outra	74
Fig.4.3 – Esquema das secções do túnel estudado	74
Fig.4.4 – Curva F-N definidora do risco global do túnel idealizado	80
Fig.4.5 – Curva F-N definidora do risco associado a cada cenário para o túnel idealizado	81
Fig.4.6 – Curva F-N definidora do risco global do Caso 1	85
Fig.4.7 – Curva F-N definidora do risco global do Caso 2	87
Fig.4.8 – Curva F-N definidora do risco global do Caso 3	88

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 1.1 – Lista dos mais significativos acidentes em túneis dos últimos anos	2
Quadro 2.1 – Vista geral de práticas em diferentes países.....	14
Quadro 2.2 – Requisitos da análise de risco por fase de projecto	14
Quadro 2.3 – Resumo das propriedades de cada método enunciado.....	18
Quadro 2.4 – Adequabilidade dos métodos estudados a cada fase do projecto	19
Quadro 2.5 - Valores propostos para o coeficiente β de ponderação da relação do indivíduo com o túnel	22
Quadro 2.6 – Perfil de atitude face ao risco	22
Quadro 2.7 – Quadro resumo dos resultados do estudo do EuroTAP	30
Quadro 3.1 – Resumo dos fogos estudados	33
Quadro 3.2 – Sistema de grupos proposto	39
Quadro 3.3 – Resumo dos cenários considerados pelo DG-QRAM	48
Quadro 3.4 – Correspondência das DG dos cenários considerados com as classes tipificadas de DG que representam	49
Quadro 3.5 – Correspondência entre os cenários e a classificação de túneis PIARC	49
Quadro 3.6 – Taxas de ocorrência dos cenários que envolvem DG	52
Quadro 3.7 – Equações Probit empregues para avaliação do grau de letalidade	55
Quadro 3.8 – Categorias de dano estrutural consideradas pelo DG QRAM	56
Quadro 3.9 – 13 cenários de acidente considerados e seus mais proeminentes efeitos.....	58
Quadro 3.10 – Categorias de sistemas de alerta	66
Quadro 3.11 – Tempos para diferentes cenários de evacuação referentes a cada classe de alerta	67
Quadro 4.1 – Definição das secções concebidas (Direcção A)	75
Quadro 4.2 – Definição das secções concebidas (Direcção B)	75
Quadro 4.3 – Ocupação média de cada tipo de veículo por período do dia.....	76
Quadro 4.4 – Velocidades de circulação para cada tipo de veículo por período do dia	77
Quadro 4.5 – Composição do tráfego no túnel em estudo.....	78
Quadro 4.6 – Resumo das características base principais do túnel idealizado	79
Quadro 4.7 – Medidas redutoras de risco.....	83
Quadro 4.8 – Descrição dos casos a analisar	84
Quadro 4.9 – EV para cada caso e cenário	88

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

F – Frequência

I – Fluxo de radiação incidente [kW/m^2]

I_r – Potência radia por unidade de área [kW/m^2]

K - Coeficiente de transmissão térmica [$\text{W/m}^2\text{°K}$]

L_T – Carga térmica [$(\text{W/m}^2)^{4/3}\text{s}$]

N – Consequência [vítimas mortais]

P – Probabilidade

Pr – Probit

Q – Potência Calorífica [MW]

Q_r – Potência calorífica radiada (MW)

T_{pre} – Tempo de pré-movimento na evacuação [s]

T_r – Coeficiente de transmissividade da atmosfera

V_f – View Factor

ADR – European Agreement on the International Carriage of Dangerous Goods

ALARP – As Low as Reasonably Possible (Tão Baixo Quanto Razoavelmente Possível)

AR – Análise de Risco

BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

CCTV – Closed Circuit of Television

DARTS – Durable and Reliable Tunnel Structures

DG HGV – Dangerous Good Heavy Good Vehicle (Veículo pesado de mercadorias que transporta mercadorias perigosas)

DG QRAM Dangerous Goods Quantitative Risk Assessment Model

DRA – Deterministic Risk Approach

DSM – Decision Support Model

ETA – Event Tree Analysis

EU – União Europeia

Euro TAP – European Tunnel Assessment Program

EV – Expected Value (Risco Expectável)

FIT – European Thematic Network Fire in Tunnels

FMECA – Failure Mode, Effects and Critically Analysis

FTA – Fault Tree Analysis

GHS – Global Harmonized System

GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

HAZOP – Hazard and Operability Analysis

HGV – Heavy Good Vehicle

IDLH – Immediately Dangerous for Life and Health

INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

IR – Risco Individual

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MCA – Maximum Credible Analysis

Mcp – Melhor Cenário Possível

MVKm – Milhões de Veículos Quilómetro

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PHAST – Process Hazard Analysis Software Tool

PIARC – World Road Association

Ppmv – Partes por milhão em volume

PRA – Probabilistic Risk Assessment

QRA - Quantitative Risk Assessment

QRAM- Quantitative Risk Assessment Model

RRT – Rede Rodoviária Transeuropeia

SR – Risco Social

TMD(A) – Tráfego Médio Diário (Anual)

TNO - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research

TNT - Trinitrotolueno

TRC – Thornton Research Centre

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe

UPTUN - Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels

VCE – Vapour Cloud Explosion

1

ESTADO DA ARTE. ENQUADRAMENTO SOCIAL E LEGAL DO PROBLEMA

1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

O rápido ritmo de desenvolvimento e modernização das redes de estradas europeias produz necessariamente uma estrutura rodoviária cada vez mais submetida e adaptada às condicionantes topográficas impostas pelos terrenos originais nos quais esta se implanta. Esta dinâmica de crescimento traduz-se, na prática, em maiores exigências de velocidade e de eficiência ao nível das vias de comunicação o que, devido aos factores de projecto orográficos mais diversificados, obrigam ao recurso a segmentos em viaduto e em túnel.

Actualmente verifica-se um apreciável crescimento do número de túneis no mundo (ver, para o panorama Europeu, a figura 1.2, adiante neste capítulo) sendo que, desses, parte considerável são túneis de grandes dimensões (mais de 1000m) – ver anexo A. A ponderação deste facto com as experiências da história recente no que respeita aos desastres em túneis vem mostrar a premente necessidade de se efectuar uma revisão dos procedimentos de segurança dos mesmos, tanto em projecto como naqueles que já se encontram em exploração. Apesar de se saberem menos frequentes quando comparados com acidentes/desastres em secção de estrada aberta, estas ocorrências no interior de secções em túnel podem suceder embora com probabilidades mais baixas. No entanto, as consequências de eventos desta natureza podem, quando dentro de túneis, ser devastadoras e de dimensões incalculáveis quando não devidamente controladas seja ao nível de vítimas humanas, ao nível de danos estruturais e impactes na economia de transportes.

Mais especificamente, as catástrofes do Túnel do Monte Branco em França e Itália e do Túnel Tauern na Áustria, vieram demonstrar a urgente necessidade de melhorar a prevenção e mitigação de acidentes em túneis. O exaustivo estudo realizado com base nas causas, falhas e consequências destes acidentes por inúmeras entidades veio pôr sobre a questão da segurança em túneis uma tónica que até aí havia sido sempre muito ténue e negligenciada. Tal investigação conduziu a diversas conclusões no âmbito de iniciativas, em larga escala, patrocinadas pela União Europeia. Essa actividade será, mais adiante neste trabalho, detalhadamente analisada e debatida. Interessa no entanto, neste espaço introdutório, salientar, de um modo genérico, que nos agentes intervenientes e decisores com responsabilidades ao nível da segurança em túneis se difundiu e instalou a ideia de que é essencial criar e fomentar critérios seguros de construção e desenho para os novos túneis, reorganizar a gestão e configuração dos túneis já em serviço, fornecendo instrumentos adequados de suporte a decisões para essa mesma gestão, acompanhar e monitorizar o estado dos sistemas de segurança nos túneis e, por

último, assegurar melhor informação e comunicação com os utilizadores. Mais se concluiu que, com planos integrados de intervenção, aplicados especificamente às particularidades de cada caso mas sustentados nestas linhas-chave de acção, as consequências poderiam ser, a todos os níveis, significativamente reduzidas [1].

A elaboração da presente dissertação, inserida na unidade curricular “Investigação em Vias de Comunicação” do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pretende discorrer sobre as especificidades que a construção de soluções rodoviárias em túnel encerra sob o ponto de vista do risco gerado pelo emprego de tais recursos. Assim, o objectivo central do trabalho é o de estudar as diferentes abordagens e procedimentos de análise de risco em túneis rodoviários, evidenciando nessa análise as particularidades relacionadas com o risco do transporte de mercadorias perigosas e a sua mais proeminente consequência, um incêndio.

1.2. ENQUADRAMENTO SOCIAL E LEGAL

Até ao ano de 1999, a percepção e sensibilidade sociais quanto às possíveis consequências e danos que se poderiam produzir perante um desastre no interior de um túnel eram reduzidas, ao ponto de não existir na sociedade uma demanda significativa de actuação no capítulo dos procedimentos de segurança em túneis. Esta conduta de certa forma laxista, alastrava-se às entidades responsáveis nesta matéria (desde construtores, a concessionários, a entidades políticas) sustentando um perigoso cenário de negligência geral. Nesse mesmo ano, dois gravíssimos acidentes acima referidos (Mont-Blanc e Tauern) sucederam. Para além dos custosos danos materiais, ambientais e até em termos de congestionamento do tráfego, o impressionante número de vítimas mortais fala por si. Estimativas apontam para custos directos de reparação em túneis alvo de desastre recente o valor de 210 milhões € por ano na UE. A estes acrescem os custos indirectos do fecho dos túneis que têm graves impactes na economia Europeia, já que aumentam os custos de transporte e reduzem a sua competitividade devido aos maiores trajectos alternativos a realizar (no caso do túnel de Mont-Blanc, o seu fecho teve um custo indirecto só para a Itália que rondou os 400 milhões € por ano).

Há, na história recente e por todo o mundo, registos de outros grandes acidentes em túneis que importa aqui documentar.

Quadro 1.1 – Lista dos mais significativos acidentes em túneis dos últimos anos [2]

Ano	Nome	País	Extensão (m)	Mortes
1978	Velsen	Países Baixos	770	55
1979	Nihonzaka	Japão	2000	9
1982	Celdecott	EUA	1000	7
1983	Pecorile	Itália	600	8
1989	Brenner	Áustria	412	2
1995	Pfänder	Áustria	6800	3
1996	Isola delle Femmine	Itália	148	5

1999	Mont-Blanc	França – Itália	11600	39
1999	Tauern	Áustria	6000	12
2001	Gleinalm	Áustria	8800	5
2002	San Gotard	Suíça	12600	11
2005	Frejus	França – Itália	12900	2

O referido ano de 1999 é, então, um ponto de viragem. A segurança em túneis rodoviários passa, aí, a ser objecto de preocupação da opinião pública e de grande interesse para os especialistas e estudiosos da área, essencialmente devido à consciencialização crescente do risco envolvido motivada pelos incidentes catalogados. Na verdade, tem-se vindo a assistir a uma mudança de paradigma a nível mundial e, mais especificamente no panorama Europeu, no que concerne à segurança em túneis. Os diferentes agentes envolvidos neste desígnio, nomeadamente os políticos e legisladores, viram-se forçados a actuar de forma eficiente e tranquilizadora perante uma sucessão pouco espaçada no tempo de graves desastres que vieram alertar consciências adormecidas e serem prossecutores de uma dinâmica geradora de inúmeras iniciativas que tiveram lugar aos níveis nacional, europeu e internacional e conduziram a interessantes desenvolvimentos regulamentatórios e legislativos.

Logo no ano de 2001, a Comissão Europeia, no seu Livro Branco sobre política Europeia de transportes [3], dedica um artigo à questão da segurança em túneis no qual realça a premente necessidade de, a curto/médio prazo, serem definidas exigências mínimas de níveis de segurança harmonizados aplicáveis aos túneis da Rede Rodoviária Transeuropeia (RRT) nos aspectos técnicos e operacionais mais relevantes: equipamento, regras de trânsito e informação aos utilizadores. As linhas orientadoras expressas no Livro Branco, aliadas ao ambiente de mudança paradigmática em termos de segurança traduziram-se na constituição de múltiplos painéis e grupos de peritos (*expert groups*), projectos específicos de investigação e desenvolvimento de marcos legais cada vez mais exigentes e conducentes a uma revolução nos padrões de segurança no projecto, construção e exploração de túneis rodoviários. É de interesse para o presente estudo listar alguns desses principais grupos de investigação, sumarizando o seu objectivo e trabalho produzido, para depois apresentar com maior detalhe aquele que é, a nível internacional, o mais importante texto legislativo e pedra angular da segurança em túneis na Europa: a Directiva 2004/54/EC [4].

1.2.1. PRINCIPAIS GRUPOS DE INVESTIGAÇÃO

Visto que está que a União Europeia constituiu, entre o final da década de 90 e o início do novo século, um pólo pioneiro de implementação legislativa em questões de segurança nos túneis, começa-se por enunciar alguns dos principais grupos/organizações financiados pela UE que estabeleceram o trabalho de investigação de base que sustenta a formação e aplicação dessas mesmas leis.

- FIT, *European Thematic Network Fire in Tunnels* – constituído por 33 parceiros de 12 países da EU, funcionou de 2001 a 2005 com o objectivo de desenvolver uma rede de segurança em fogos em túneis, estabelecendo bases de dados consultáveis sobre os mais diversos temas relacionados com essa matéria;
- DARTS, *Durable and Reliable Tunnel Structures* – formado por 8 parceiros europeus desde 2001 a 2004, teve como objectivo principal o desenvolvimento de ferramentas de apoio à tomada de decisões na construção de túneis minimizando custo e tendo em

atenção as condições ambientais e geotécnicas bem como precauções referentes à segurança e à longevidade estrutural;

- UPTUN, *UPgrading of Existing TUNNELS* – composto por 41 empresas e institutos parceiros originários de 13 países da EU mais a Noruega, desenvolveu o seu trabalho entre os anos 2003 e 2006 na procura de métodos sustentáveis, inovadores e eficientes quanto ao custo para melhorar os sistemas anti-incêndio em túneis já existentes. Para tal, desenvolveu um leque de tecnologias inovadoras para a aplicação a para da demonstração e promoção de procedimentos de avaliação razoável de segurança e de partilha de tecnologia. Dividia-se numa estrutura formada por 7 grupos de trabalho inter-articulados e com ligações às organizações previamente mencionadas;
- Safe T, *Safety in Tunnels* – com 22 parceiros envolvidos a trabalhar entre 2002 e 2005, foi uma rede temática de desenvolvimento das linhas estratégicas Europeias para o melhoramento dos índices de segurança em túneis, com base nas melhores práticas de prevenção e mitigação de incidentes e acidentes em túneis já existentes e em estudos de tráfego aprofundados;

Estas e outras estruturas de base científica, formaram projectos de investigação que se inter-relacionaram na perfeição, sendo notória a sua complementaridade, que a imagem seguinte evidencia. Porém, a segurança absoluta não é atingível já que nunca são dominadas todas as questões inerentes. Nem sequer é absolutamente necessário que assim seja, basta que se saiba o suficiente para controlar o risco intrínseco, situação que, aparentemente, ainda não se verifica dados os acidentes recentes (ver quadro 1.1). Assim este processo de investigação e estudo sobre segurança é indispensável que continue a ser praticado a nível Europeu, eventualmente de forma ainda mais eficiente que permita rapidamente disponibilizar no mercado as constantemente inovadoras soluções tecnológicas descobertas que dêem resposta a essas questões de um modo essencialmente *holístico*, isto é, encarando os túneis como um grande sistema que encerra diferentes valências e características inter-funcionais.



Fig.1.1 – Principais projectos Europeus de investigação e seu relacionamento [5]

Outras organizações de nível mundial tiveram também um papel importante na congregação de esforços para as melhoras significativas nos padrões de segurança nos túneis, com a produção de investigação e relatórios orientadores. De entre elas podem destacar-se:

- PIARC, *World Road Association* – é um fórum internacional de discussão e análise de temas relacionados com a segurança em túneis rodoviários, identificando, desenvolvendo

e disseminando as melhores práticas de gestão da segurança em túneis e dotando de melhor acessibilidade a informação produzida a esse respeito. O seu grande objectivo é o de elevar o nível de segurança e eficiência no uso do sistema rodoviário levando em linha de conta as suas estruturas (túneis, por exemplo), incluindo o movimento de pessoas e bens nesse mesmo sistema, enquanto gere/controla os riscos associados com as operações de transporte rodoviário e o ambiente envolvente. Esta descrição encerra em si mesma a essência do presente trabalho de investigação, facto pelo qual se percebe que uma significativa parte dos recursos empregues para a sua elaboração (fontes bibliográficas, estatísticas, recursos informáticos) estejam de alguma forma relacionados com o PIARC (chancela, financiamento, know-how etc);

- TNO, OCDE, UNECE.

1.2.2. A DIRECTIVA EUROPEIA SOBRE SEGURANÇA EM TÚNEIS

Proposta inicialmente em 2002 e entrada em vigor em 2004, a Directiva 2004/54/CE sobre os requisitos mínimos de segurança nos túneis da RRT vem constituir a aplicação legal prática que reflecte e encerra toda a dinâmica de investigação gerada em torno da segurança nos túneis, assumindo um papel primordial na mudança de paradigma sobre este assunto. Arrogando a responsabilidade sobre o sistema de túneis da RRT e considerando a sua extrema importância nesse mesmo sistema, os dados relativos ao aumento de risco devido à antiguidade dos túneis e à mudança no perfil de utilização dos mesmos consubstanciaram uma iniciativa legislativa em larga escala com um duplo objectivo:

- **Prevenção.** Objectivo primeiro da proposta da Comissão Europeia é o de prevenir eventos críticos que ponham em perigo vidas humanas, o ambiente e a estrutura;
- **Minimização de possíveis consequências.** Objectivo segundo é o de garantir às pessoas envolvidas num acidente meios de auto salvamento ou escape, permitindo uma mais eficiente intervenção dos serviços de emergência.

Essa proposta determina que todos os túneis com extensão igual ou superior a 500m, em operação, em construção ou em fase de projecto, e que pertençam à RRT, devem ser sujeitos aos novos e harmonizados critérios regulamentares de segurança. Tais exigências reflectem-se sobre um universo de túneis graficamente esquematizado na imagem 1.2 (na página seguinte).

Os parâmetros de exigência estabelecidos na Directiva assentam numa harmonização bivalente, direccionada para requisitos **Organizacionais** (organização da gestão da segurança ao nível nacional para clarificar papéis e responsabilidades), bem como para requisitos **Técnicos** (infra-estruturais, operacionais, dos veículos e da informação aos utilizadores). No anexo B podem observar-se os principais factores condicionantes para a segurança de um túnel.

Assim, as análises de risco são obrigatórias sempre que os requisitos mínimos especificados na Directiva não estejam assegurados. Esta plataforma legal permite, deste modo, que as transposições para as ordens jurídicas nacionais possam ser sustentadas por soluções inovadoras e diferentes das previstas/sugeridas pela Norma Europeia, desde que sejam assegurados os níveis de segurança requeridos por meio de uma Análise de Risco a anexar ao projecto. Tal facto permite, adicionalmente, que sejam reduzidos significativamente os custos direccionados para a modificação das redes de túneis para as dotar de níveis de risco considerados aceitáveis. O espectro de custos previstos pode, como tal, variar entre os 6.3 biliões €, num cenário de adopção exclusiva das medidas referenciadas na Norma para novos túneis, e os 2.6 biliões €, num cenário ponderado em que os estados membros decidam

recorrer a medidas alternativas de mitigação de riscos [6]. No que aos prazos de aplicação respeita, é sugerido um período de 10 anos para a (re)conversão totalidade dos túneis visados.

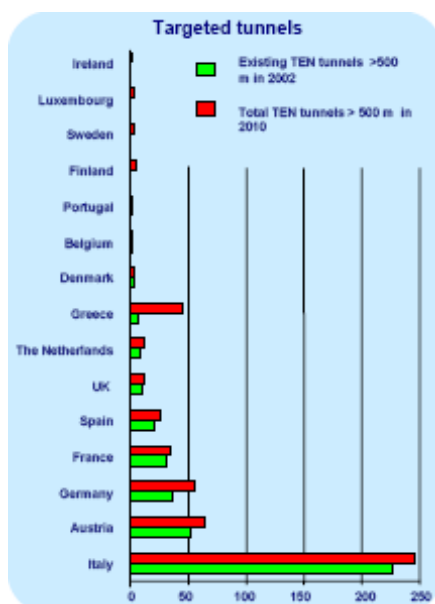


Fig.1.2 – Túneis sob o âmbito da Directiva 2004/54/CE [6]

Em Portugal, esta directiva foi transposta para a ordem jurídica nacional através da publicação do Decreto-lei nº 75/2006 de 27 de Março de 2006, no qual o regime de requisitos mínimos de segurança foi alargado a todos os túneis da Rede Rodoviária Nacional [7].

É relevante notar ainda que posteriormente ao desenvolvimento deste quadro legal e à respectiva entrada em vigor nos estados membros, a UE em parceria com alguns dos grupos de especialistas acima referidos, trabalhou no desenvolvimento de um procedimento harmonizado de análise de risco, procedimento esse que será adiante rigorosamente estudado.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação, na procura de constituir um documento valioso e útil para aqueles que se debruçarem nos temas nela tratados, está organizada segundo uma lógica de compreensão dos fenómenos na óptica de um analista de risco que necessita de fundamentar os seus pareceres relativamente a um determinado túnel. Neste primeiro capítulo, introduz a questão dos acidentes em túneis e a forma como, historicamente, ela vem sendo tratada a nível social, político e no seio da comunidade científica.

No segundo capítulo é apresentada com detalhe a problemática da análise de risco, discorrendo sobre todas as especificidades que esse conceito acarreta quando direccionado para o estudo de túneis rodoviários. Expõem-se as principais metodologias teóricas de análise de risco, reflectindo sobre a noção de risco, a sua aceitabilidade e o seu impacto.

O terceiro capítulo dedica-se a aprofundar conceptualmente a análise de risco associada ao transporte de mercadorias perigosas. Enquadra-se o problema no panorama internacional com a descrição de diversos processos destinados a lidar com esta questão. Orienta-se o estudo para os modelos quantitativo, particularmente para o modelo DG QRAM, desenvolvido pelo PIARC e pela OCDE.

Realiza-se uma compreensão exaustiva deste modelo em todas as suas vertentes numa óptica de utilizador da ferramenta como suporte para decisões de projecto, construção ou manutenção de um túnel.

O capítulo quatro destina-se a aplicar, através do QRAM, a fundamentação teórica anteriormente estruturada, percebendo as possibilidades e limitações do modelo e simulando uma tomada de decisão perante um caso concreto. É feita um estudo crítico aos resultados obtidos para um túnel concebido para esse efeito, sendo que é explicado todo o processo de introdução, interpretação e análise de dados.

O quinto capítulo tem o objectivo de apresentar as conclusões gerais do trabalho realizado, deixando também algumas sugestões de desenvolvimento futuro que sejam oportunas e possam de certa forma, constituir um complemento válido ao que foi efectuado nesta dissertação.

2

A ANÁLISE DE RISCO. ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO DO PROBLEMA

2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS E CONCEITOS GERAIS

É de todo o interesse começar por introduzir o conceito de **Risco** e outros conceitos relacionados, procurando definir, de forma contextualizada e no âmbito deste trabalho, esses termos. Risco é, num sentido lato, a tentativa de medir o grau de incerteza com que um determinado acontecimento danoso ou prejudicial pode suceder, isto é, a contingência ou proximidade de um dano [2]. Estabelece-se, no teor de um estudo sobre túneis rodoviários, como a medida da verosimilhança de uma pessoa que percorre um túnel incorrer num acidente. Com significado próximo, porém com diferenças que importa aclarar, encontra-se o conceito de **Perigo**, sendo que este é a contingência iminente de que suceda um acidente. Por conseguinte, a diferença essencial entre os dois termos reside na proximidade da ocorrência.

O conceito de risco encerra em si dois aspectos basilares:

- Probabilidade de ocorrência (P) – já que a noção de risco não implica uma iminência do acidente em análise, é essencial associá-lo a um conceito estatístico que concretize de alguma forma as possibilidades com que tal acidente pode ocorrer;
- Consequência (N) – uma medida dos danos provocados pelo eventual acontecimento do acidente (danos materiais, económicos ou fatais).

A transposição desta definição para o campo de actuação da Engenharia resulta na quantificação do risco através do produto entre os dois aspectos referidos, isto é:

$$R = P \times N \quad (1)$$

Tal transposição para a Engenharia assume-se como uma ferramenta fundamental para o correcto desenvolvimento de estudos prévios, de alternativas e, inclusivamente, de soluções construtivas, de tal forma que há definições de projecto de engenharia que supõem a avaliação de riscos subjacentes à construção e instalação de todos os agentes que intervêm no mesmo [2][5]. É o que acontece com o caso dos Túneis que, nas condições descritas no capítulo 1, são obrigatoriamente sujeitos a análises de risco detalhadas, seja qual for o seu estado de concepção. Afigura-se, assim, conveniente, aprofundar e perceber as características deste processo avaliativo que, no fundo, é o cerne deste trabalho.

A **Análise de Riscos** é uma ferramenta que foi inicialmente desenvolvida para investigar a segurança de processos industriais potencialmente perigosos, principalmente na indústria química e nuclear.

Durante os últimos 20 anos, esta ferramenta tem vindo a ser aplicada, com as devidas adaptações à sua forma “original”, na investigação de segurança rodoviária, em particular aos túneis. Tal aplicação tem como objectivo o estabelecimento de uma estratégia proactiva e sistemática de investigação de potenciais riscos, vindo substituir a estratégia baseada na experiência usada até então. Em geral, a análise de riscos joga com as potenciais futuras consequências negativas de um acontecimento. Não sendo possível prever o futuro, ela é usada de modo a desenvolver um modelo que retrate, tão realisticamente quanto possível, o risco associado a um dado sistema. Tendo em consideração os limites humanos da investigação, este modelo representa sempre uma simplificação mais ou menos detalhada da realidade que, no entanto, fornece um muito mais eficiente entendimento do que os processos baseados em experiências passadas.

Simplificando, pode resumir-se a definição de Análise de Risco (AR) a quatro tópicos orientadores [1]:

- AR é uma abordagem sistemática de análise de sequências e inter-relações em potenciais incidentes/acidentes (adiante se explicará a diferença entre estes conceitos), identificando pontos fracos do sistema e reconhecendo possíveis medidas de melhoramento;
- O termo AR cobre uma larga família de diferentes abordagens, métodos e modelos complexos para tarefas específicas;
- AR pode incluir a quantificação do risco quando é empregue na base de estudos de performance do sistema relativamente à segurança;
- Um princípio básico de qualquer AR em túneis é a abordagem holística do sistema, incluindo infraestruturas, veículos, operação e utilizadores.

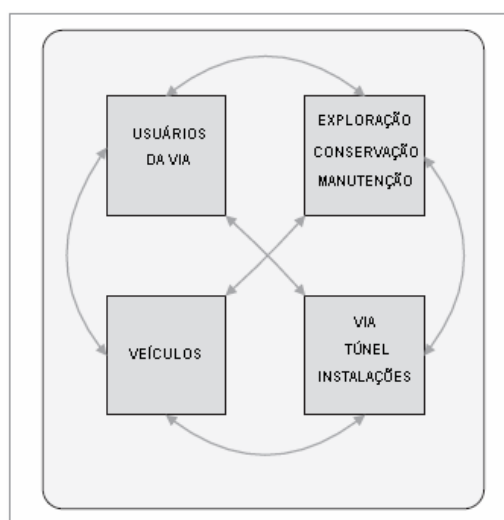


Fig.2.1 – Abordagem holística da segurança em túneis rodoviários [2]

Neste contexto, os objectivos da AR podem ser:

- Verificar a consistência geral do planeamento de segurança;
- Escolher entre várias alternativas;
- Demonstrar que as exigências de segurança são cumpridas, e.g. no caso de haver desvios das prescrições iniciais;
- Optimizar o planeamento de segurança em termos de eficácia de custos.

A generalidade da bibliografia é praticamente unânime quanto à estruturação do processo de avaliação de risco mesmo que, por vezes, sejam usados termos distintos referindo-se ao mesmo conceito. Como tal, o apresentado seguidamente resulta de opções tomadas pelo autor num compromisso entre o estudado nas diferentes fontes bibliográficas e aquilo que o autor entende como susceptível de mais fácil compreensão. Deste modo, pode introduzir-se a análise de risco como uma fase de um amplo e complexo **processo de avaliação de risco** (ver figura 2.2). Para além da AR, que pretende responder à questão “o que pode acontecer e quais as consequências?”, podendo ser realizada de um modo quantitativo (probabilístico) ou qualitativo (determinístico) – adiante serão examinados estes aspectos –, existe ainda a **avaliação de riscos** e a **redução de riscos**.

A gestão de risco é direccionada para a questão da aceitabilidade, pretendendo responder à questão “será o risco estimado aceitável?”. Para tal, é necessária a definição dos chamados critérios de risco e confrontar os valores de risco calculados para o sistema em estudo com estes critérios, concluindo da aceitabilidade ou não dos mesmos. No caso de não serem aceitáveis, há que criar um plano de intervenções destinadas à sua minimização, dando-se prioridade aos riscos com maior probabilidade de ocorrência e consequências mais gravosas. No que concerne aos critérios de risco será realizado um estudo mais profundo sobre este tema mais à frente neste capítulo.

A redução de riscos é exactamente a etapa já afluída no parágrafo anterior, que diz respeito à criação de um plano de escolha e implementação de medidas mitigadoras de risco no sistema, respondendo à questão “que medidas são necessárias implementar para tornar o sistema seguro?”. Podem ainda discutir-se acerca deste assunto os aspectos relacionados com a eficiência e o custo-benefício das medidas a implementar, o que será efectuado em capítulos posteriores desta dissertação.

Antes de se proceder à AR propriamente dita, o sistema do túnel sob investigação tem que ser correctamente definido. O sistema consiste na estrutura, no equipamento, no tráfego, procedimentos etc., devendo incluir todas as questões de projecto e seus parâmetros relacionadas com segurança, seja num projecto feito de raiz ou num túnel já existente. Seguidamente, o procedimento de AR engloba três passos principais:

- Identificação de perigos;
- Análise de probabilidades de ocorrência dos cenários ou eventos relevantes;
- Análise de consequências desses mesmos cenários.

O esquema simplificado da figura 2.2 ajuda a entender a descrição processual aqui feita.

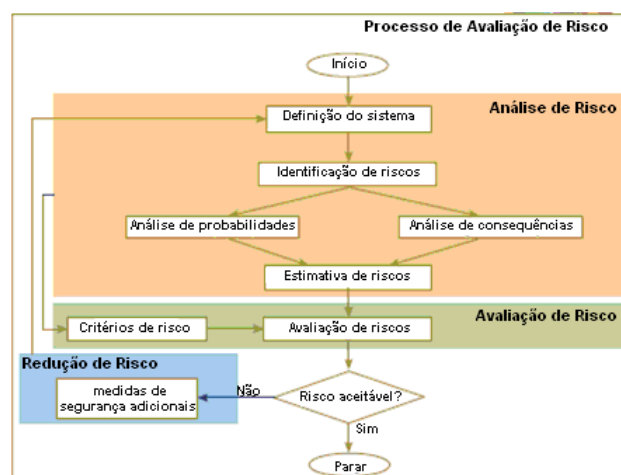


Fig.2.2 – Esquema representativo do processo de avaliação de risco [adaptado de 1]

2.2. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO

Pretende-se com este subcapítulo realizar uma abordagem genérica sobre os métodos e aspectos mais importantes usados no processo de análise de risco visto em 2.1. Tendo em consideração a coerência necessária com o que aí foi explanado, podem distinguir-se na bibliografia sobre o tema duas formas de medição do risco que correspondem a interpretações diferentes sobre esse mesmo conceito [8].

A primeira abordagem diz respeito a um **atributo intrínseco** de uma acção potencialmente perigosa, associado ao tratamento objectivo de acontecimentos que podem ser explicados, previstos e controlados por acções técnico-científicas independentes de quaisquer valores subjectivos.

Já a segunda abordagem tem a ver com um **atributo de percepção**, destacando a dependência do risco relativamente à percepção e interpretação das pessoas a ele expostas e sendo, obviamente, uma abordagem baseada na subjectividade.

Seja no âmbito de uma ou outra abordagem, existe um largo espectro de métodos qualitativos e quantitativos aplicáveis. No entanto, é no âmbito da primeira, a de atributo intrínseco, que se inserem as avaliações de risco na Engenharia, pelo que, será nesta vertente mais técnica que se irá basear este estudo. Os **métodos qualitativos ou determinísticos** (DRA, do inglês *Deterministic Risk Assessment*) são, normalmente, dotados de um grau de complexidade baixo, sendo muitas vezes de simples, fácil e flexível uso. Podem ser usados na grande maioria dos problemas mas têm como inconveniente não possuírem elementos do sistema devidamente correlacionados, analisando cenários de forma individualizada sem recorrer a probabilidades de ocorrência. O significado deste tipo de análise é fortemente influenciado pela percepção no momento em que é feita, com base em cenários específicos. São métodos geralmente advogados pelos responsáveis dos procedimentos de emergência pois as suas preocupações residem nas possibilidades de redução de casualidades e em lidar com elas. Já os **métodos quantitativos ou probabilísticos** (PRA, do inglês *Probabilistic Risk Assessment*) estruturam os possíveis eventos de forma lógica e integrada (correlacionada), analisando diferentes cenários e possíveis eventos subsequentes com identificação das influências relevantes. Para cada um dos encadeamentos de eventos subsequentes as frequências e as consequências são estimadas, as primeiras em forma de probabilidade e as segundas em número de mortos (alternativamente pode também expressar-se os feridos ou até mesmo em valor monetário). A grande vantagem do uso destes métodos é a transparência na representação das correlações usadas que permitem calcular o risco, já que pressupõem a análise conjunta de diversos cenários aos quais está sempre associada uma probabilidade de ocorrência calculada de modo explícito. Por outro lado apresentam os inconvenientes de haver problemas que não se ajustam a este tipo de resolução e de ser difícil ter disponível suficiente informação em dados quantitativos que permitam dar valores concretos aos mais importantes parâmetros. Ambas as vertentes descritas estão representadas pelos esquemas seguintes, nas suas dimensões com base no cenários individualizados e no sistema como um todo, respectivamente.

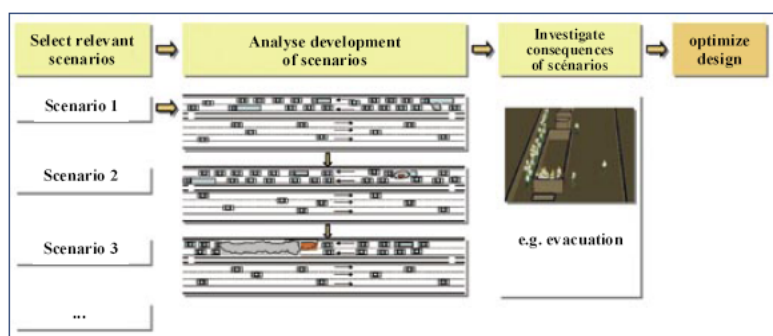


Fig.2.3 – Esquematisação do conceito dos métodos qualitativos (cenário)

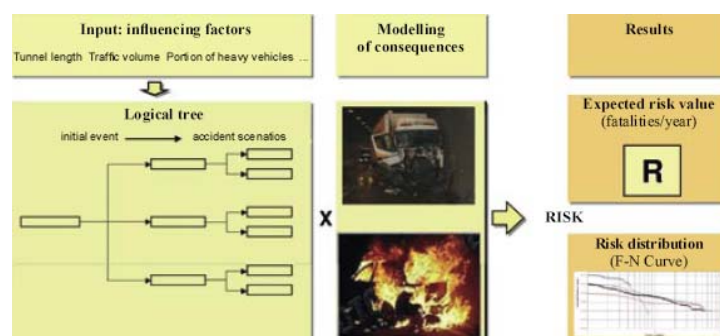


Fig.2.4 – Esquematisação do conceito dos métodos quantitativos (sistema)

Na verdade, as análises quantitativas ou probabilísticas e as qualitativas ou de cenário estão fortemente relacionadas entre elas. De facto, são variações combinadas de uma de uma análise do tipo “probabilidade e consequência”. Ambas consideram os efeitos e consequências de eventos indesejados, os já mencionados cenários de acidente, tendo cada uma das abordagens o seu papel no sistema de análise. A sua diferença intrínseca reside, como se percebe, na consideração específica de probabilidades de ocorrência no caso das análises quantitativas, enquanto as análises de cenário se focam nas consequências. Pode então dizer-se que as duas teorias se localizam algures entre uma análise totalmente probabilística (ou de frequência) e uma análise puramente de consequências, como mostra a figura 2.5.

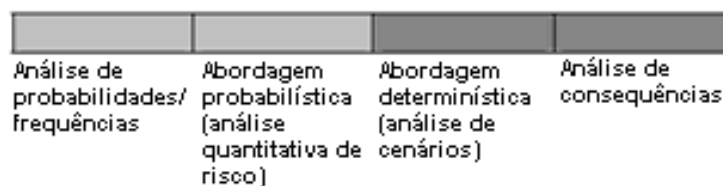


Fig.2.5 – Abordagens probabilística e determinística numa escala probabilidade - consequência [9]

Como nota complementar, será interessante ter uma ideia das experiências práticas de diferentes países nesta matéria (ver quadro 2.1). Realce-se que diferentes métodos são aplicados em diferentes países. Este facto explica-se, não só pelas preferências específicas de cada um mas, essencialmente, pela adequabilidade das características das bases de dados de entrada (inputs) disponíveis a um determinado modelo. Noutra perspectiva e como facilmente se compreende, numa fase prematura do projecto há menor quantidade de dados disponível para a avaliação de risco do que numa fase mais avançada. Por essa razão, há orientações sobre os requisitos que tem que cumprir uma análise de risco nas diferentes etapas do projecto ou já mesmo em exploração. Esses requisitos estão expressos no quadro 2.2 e serão, no ponto seguinte, simetrizados com as propriedades de diferentes modelos a aplicar.

Quadro 2.1 – Vista geral de práticas em diferentes países [10]

	Canadá	França	Reino Unido	Holanda	Suécia	EUA
Método Aplicado	Análise de Risco Qualitativa	Análise de Risco Quantitativa	Análise qualitativa dos riscos no projecto e operação	Análise de Risco Probabilística	Análise de Risco Probabilística	Análise de Risco Probabilística
	Análise Determinística		Análise Determinística de cenários	Análise Determinística de cenários	Análise Determinística de cenários	Análise Determinística de cenários
Objectivo	Comparação e Classificação	Avaliação de risco relacionada com o transporte de mercadorias perigosas	Projecto baseado no risco Optimização dos procedimentos de resposta a incidentes Regulação do transporte de materiais perigosos	Aceitabilidade do desempenho de segurança Optimização dos procedimentos de resposta a incidentes Estabelecimento de objectivos de segurança	Contribuição para padrões de segurança mais elevados	Minimizar danos pessoais e estruturais Disponibilizar condições adequadas para evacuação
Modelo Aplicado	Método próprio, não standardizado	GRAM	Modelos diferentes dependendo do objectivo	TunPRIM para QRA	Modelos diferentes dependendo do objectivo	Sem modelo

Quadro 2.2 – Requisitos da análise de risco por fase de projecto [10]

	Projecto				Exploração
	Estudo de Viabilidade	Ante-projecto	Projecto Base	Projecto de Execução	Operação
Grau de exactidão	Avaliações Qualitativas	Estimativas pouco precisas	Estimativas	Estimativas detalhadas	Cálculos detalhados
Grau de detalhe	Identificação inicial dos perigos, riscos e medidas	Identificação inicial de perigos e riscos Identificação de medidas redutoras Critérios iniciais de aceitabilidade	Quantificação do risco Estudo de medidas de redução do risco Critério de aceitabilidade	Avaliação detalhada de eficiência das medidas redutoras Avaliação da aceitação	Avaliação detalhada de eficiência das medidas redutoras Avaliação da aceitação
Input	Experiência genérica	Experiência genérica Modelos pouco precisos Dados genéricos	Experiência Modelos Informação estatística	Experiência Modelos Informação estatística	Auditorias e inspecções Informação estatística específica
Output	Avaliação de importância	Estimativas de riscos e custos	Riscos e custos em função dos parâmetros básicos Critério de aceitabilidade	Bases para a documentação do projecto	Dossiê de segurança Base para novos procedimentos de segurança

2.3. A APLICAÇÃO PRÁTICA EM CADA FASE DO PROCESSO. MÉTODOS A USAR.

É vantajoso estudar com maior detalhe até que ponto diferentes métodos práticos podem ser especificados para as 3 fases do processo de avaliação de riscos e para as distintas fases do projecto, para tornar claro quais as características respectivas de cada método que o tornam adequado ou não para essas fases. É de salientar o facto de, na maioria das vezes, e dada a complexidade do processo avaliativo em causa, a optimização desse processo é conseguida pela combinação racional e complementar de métodos. Deve também notar-se que a selecção dos métodos mais apropriados para a avaliação de risco de um determinado túnel depende de vários factores, entre os quais estão as características e requisitos específicos do problema em análise e do sistema que se lhe associa e ainda a disponibilidade de (bases de) dados próprias ou outra informação relevante.

Como já se abordou nas explicações anteriores, tanto nas DRA como nas PRA, antes de se proceder à Avaliação em si, é essencial definir quais os cenários e acontecimentos a considerar nas várias fases do processo, que devem permitir uma correcta identificação e quantificação de possíveis acidentes e incidentes. Nos parágrafos seguintes é feita uma breve descrição dos mais relevantes destes métodos de identificação de perigos em túneis rodoviários [1].

A **Checklist** é um método de avaliação e controlo de procedimentos, materiais e equipamentos. Os seus resultados facilitam e identificam áreas que requerem um estudo mais detalhado, sendo esses resultados apresentados de forma obviamente qualitativa e vinculada aos procedimentos standard.

Os métodos **What if analysis** baseiam-se na determinação e identificação das consequências derivadas de um possível incidente ou funcionamento defeituoso do sistema.

O método **HAZOP** (*Hazard and Operability Analysis*) é um dos mais desenvolvidos e estruturados métodos para o tratamento de possíveis perigos relativos a infraestruturas de transporte. Numa primeira fase, identifica todos os desvios produzidos em relação ao correcto funcionamento do sistema. Posteriormente, em reuniões de *brainstorming*, fazem-se corresponder e esses desvios identificados as respectivas causas e consequências. Conclui-se o método produzindo uma lista de linhas orientadoras como documento de trabalho. O resultado é uma lista qualitativa que inclui:

- Identificação de perigos e problemas de exploração;
- Mudanças recomendadas ao projecto e procedimentos de conservação e exploração para melhora dos padrões de segurança;
- Recomendações para a realização de novos estudos.

O método **FMECA** (*Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) é implementado mediante a ordenação dos dados relativos aos equipamentos do túnel, os diversos modos de falha e o estabelecimento de um ranking relativo de cada um dos efeitos dessas falhas.

A Árvore de Falhas - *Fault Tree Analysis*, **FTA**, é um processo dedutivo de análise que parte da escolha de um dado “acontecimento não desejado ou evento a evitar”, seja este um acidente de grande magnitude (explosão, fuga, derrame...) ou de menor importância (falha do sistema de portas), e que tem o objectivo de averiguar a origem dos mesmos, identificando todas as combinações possíveis de falhas que desemboquem nesse primeiro evento escolhido. A exploração de uma árvore de falhas pode limitar-se a um tratamento qualitativo ou aprofundar-se através da quantificação de probabilidades para cada ramo (daí este método ser mencionado noutras secções deste trabalho).

A Árvore de Acontecimentos - *Event Tree Analysis*, **ETA**, é uma técnica simples de análise quantitativa ou qualitativa que permite estudar processos sequenciais de hipotéticos acidentes, a partir de acontecimentos iniciais indesejados, chegando-se aí a um estado final do sistema. Cada evento

nesta cadeia, carrega com o peso das consequências dos eventos precedentes. Usa uma lógica binária em que facilmente se percebe quais dos sistemas subsequentes falham ou funcionam.

Seguindo a ordem lógica descrita anteriormente (ver figura 2.2), segue-se à selecção de cenários a análise de risco. No caso da aplicação da DRA, são habitualmente considerados três modelos:

- Modelo de efeitos físicos, preponderante nos cenários de incêndio, serve para descrever os efeitos da temperatura, do fumo e da limitação da visibilidade em caso de acidente, função da geometria túnel, do sistema de ventilação e outras características;
- Modelo de danos, serve para avaliar os efeitos nos utentes do túnel das condições modeladas anteriormente e estimar o tempo máximo disponível para evacuação em segurança;
- Modelo de evacuação, permite determinar o tempo de evacuação ou refúgio em local seguro dos utentes presentes no interior do túnel.

Como alguns exemplos destes modelos, podem mencionar-se o SIMULEX (aplicação informática para simulação de evacuação em túneis [10]), o SOLVENIT+TunnEVAC e o TNO – Tunnel Consequence Model [10]. De entre outros, destaca-se o método MCA (*Maximum Credible Accident Analysis*), que procede ao cálculo dos maiores danos e efeitos que um acidente pode produzir num túnel objecto de análise. O acidente em causa neste método está relacionado com um incidente relacionado com o transporte de mercadorias perigosas e/ou inflamáveis, analisando os efeitos em termos de radiação, onda explosiva, intoxicação e incêndio. Com recurso a técnicas de modelação física de fluxos, evaporação etc., definem-se esses efeitos através dos quais, e com uma análise externa dos padrões de segurança, se obtêm resultados normalmente conservadores [10].

No caso de se aplicar a PRA, há que ter em conta, não só os danos de um determinado acidente, mas também as suas frequências de ocorrência. Como foi referido anteriormente, a grande vantagem desta vertente é permitir que sejam analisados vários cenários em simultâneo. Na PRA sobressaem dois modelos distintos:

- Modelo de estimação de probabilidades, no qual se recorre às já estudadas FTA e/ou ETA na sua dimensão probabilística;
- Modelo de estimação de consequências, no qual se realiza um processo semelhante ao descrito para a DRA, embora de forma simplificada e com obtenção de resultados menos pormenorizados.

Para além destes modelos básicos, deve ainda referir-se os modelos de estudo de erro humano e os métodos de análise de sensibilidade e efeitos independentes, também eles frequentemente acoplados ao emprego da PRA.

Está bem patente no que acaba de ser exposto sobre selecção de cenários, a divisão causa – consequência na abordagem a esta fase do processo, respectivamente a montante e a jusante do acidente. Focados nas causas estão os métodos PRA e nas consequências o DRA, como já anteriormente foi explicitado. Uma boa esquematização desta linha de interpretação apresenta-se na figura 2.6, que pretende representar o amplamente conhecido “*bow tie model*” – modelo nó de gravata. Este modelo parte da constatação de que os eventos indesejados surgem a partir de (pequenas) perturbações da normal operação que resultam em acidentes que, no seu desenrolar, podem desenvolver-se de diferentes formas, dependendo da qualidade da resposta dada a esse mesmo

acidente tanto pelos serviços de emergência como pelo perfil comportamental adoptado pelos utilizadores do túnel nesse momento e pela organização técnica das medidas de segurança.

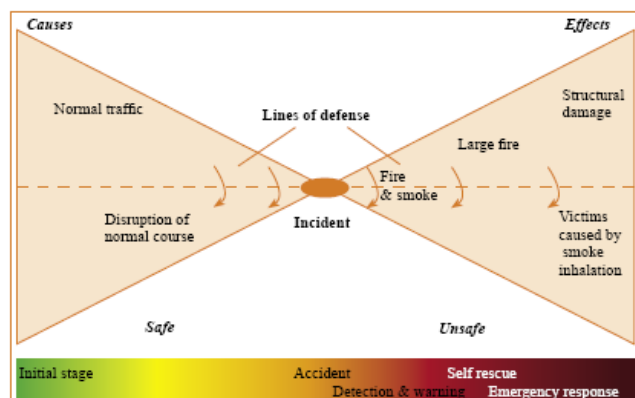


Fig.2.6 – O bow tie model aplicado a acidentes com fumo e fogo

Com o nó no centro a representar o acidente e ligando uma árvore de falhas, à esquerda nas causas, a uma árvore de eventos, à direita nas consequências, este modelo oferece um quadro largamente aceite para a abordagem à redução de risco. Relaciona-se imediatamente com a cadeia de acidente que, da sua forma simples causa – acidente – consequência, se pode desenvolver para a mais sofisticada forma de gestão de emergência,

Prevenção – Prontidão – Mitigação – Resposta - Recuperação

Um importante elemento no esquema são as linhas de defesa, que têm como objectivo servir de ponto de partida para as medidas de segurança a implementar, restabelecendo a normal situação de tráfego (eliminar a perturbação). São, em si, a representação do efeito desejado da medida de segurança que, se do lado das causas, resulta no evitar do acidente; se do lado das consequências resulta na minimização das mesmas. Os processos a destacar no modelo e que reflectem a explicação dada são:

- i) Perturbação do tráfego normal;
- ii) Incidente;
- iii) Detecção do incidente e aviso do operador e dos serviços de emergência (geralmente processo bastante rápido);
- iv) Salvamento e escape dos utilizadores dentro do túnel (que tem início simultaneamente com o processo anterior);
- v) Resposta dos bombeiros, polícia e serviços de saúde.

Os quadros seguintes são um resumo do que acaba de ser explanado. Abordam esquematicamente os métodos descritos sob os pontos de vista das suas propriedades (quadro 2.3) e da sua aplicabilidade a cada uma das diferentes fases de projecto (quadro 2.4). Atente-se que, neste quadro que resulta de uma combinação dos quadros 2.2 e 2.3, está expresso o princípio mencionado anteriormente de que o nível de detalhe exigido aumenta com a evolução no projecto. Nas fases iniciais aplicam-se métodos mais genéricos como o *checklists*, o *casuistry of comparable tunnels*. Na fase de projecto de execução métodos mais detalhados poderão e deverão ser usados. Nesta fase é, ainda, recomendado que se usem tanto métodos determinísticos como probabilísticos. Na fase de projecto de execução a aplicação dos métodos de avaliação e análise de risco devem ser usada essencialmente para provar que as pressuposições feitas previamente no processo avaliativo estavam correctas e que a fiabilidade dos

meios técnicos do túnel vai de encontro ao critério de risco adoptado na avaliação. Por fim, um túnel que esteja em operação deve ser sujeito a análises de risco que atestem a performance presente e se esta está de acordo com os critérios desejados. Neste caso, é necessário ter atenção às eventuais mudanças que possam ter ocorrido no perfil de utilização, nos sistemas técnicos e na operação do túnel.

Quadro 2.3 – Resumo das propriedades de cada método enunciado [10]

Method	Accident types							Model aspects					
	Traffic disturbance without damage	Collisions	Fire	Explosion	Leakage of aggressive and toxic materials	Nature (earthquakes, flooding)	Accidents for submerged tunnels (dropped anchors, sunken ships)	Hazard identification	Frequency calculation	Physical effects	Damage	Evacuation	Economics
Hazard identification													
Checklist								✓					
Casualty								✓					
Fault tree analysis (FTA)								✓	✓	✓	✓	✓	✓
Event tree analysis (ETA)								✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cause-consequence analysis								✓	✓	✓	✓	✓	✓
What-if analysis								✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hazard and operability analysis (HAZOP)								✓	✓	✓	✓	✓	✓
Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)								✓	✓	✓	✓	✓	✓
Deterministic safety assessment													
Maximum credible accident analysis (MCA)													
Dutch road tunnel scenario analysis	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TNO- tunnel consequence model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SIMULEX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Probabilistic risk assessment													
Fault tree analysis (FTA)								✓	✓	✓	✓	✓	✓
Event tree analysis (ETA)								✓	✓	✓	✓	✓	✓
GRAM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TUSI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
QRA Procedure by Persson	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TunPRIM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TNO- tunnel probabilistic model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Quadro 2.4 – Adequabilidade dos métodos estudados a cada fase do projecto [10]

Method	Design/upgrading				Operation maintenance
	Feasibility study	Conceptual design	Outline design	Detailed design	
Hazard identification					
Checklist	√√				√√
Casualty	√√	√			√√
What-if analysis		√	√		
Cause-consequence analysis		√	√		
Hazard and operability analysis (HAZOP)			√	√	
Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)				√	
Fault tree analysis (FTA)			√	√	
Event tree analysis (ETA)			√	√	√
Audits					√√
Inspections					√√
Deterministic safety analysis					
Maximum credible accident analysis (MCA)		√	√		√√
Dutch road tunnel scenario analysis		√	√√	√	√√
TNO-tunnel consequence model		√	√	√√	
SIMULEX			√	√√	
Probabilistic risk analysis					
QRAM		√√	√		
TUSI		√√			
QRA Procedure by Persson		√√	√		
TunPRIM		√√	√		
TNO-tunnel probabilistic model		√√	√		√

√ method can be applied in this stage of design
 √√ method is very suitable for this stage of design

De acordo com o esquema da figura 2.2 deve, agora, analisar-se o item relativo ao critério de aceitabilidade de risco. Tal será feito no subcapítulo individualizado seguinte, dada a importância deste aspecto.

2.3.1. CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DE RISCO

Importa, antes de analisar em detalhe os limites estabelecidos como aceitáveis para o risco em túneis, começar por definir esses mesmos riscos nos seus três tipos diferentes destacados e considerados pela literatura. Eles são o Risco Individual, o Risco Expectável e o Risco Social.

O **Risco Individual** refere-se ao risco a que está sujeita uma pessoa considerada isoladamente para determinadas condições de exploração do túnel. Pretende demonstrar o nível de risco a que alguém, por si só e independentemente do número de pessoas expostas, está submetido, dependendo apenas da localização geográfica. É calculado através da identificação de todas as fontes de risco de morte para um indivíduo, somado a contribuição de cada uma dessas fontes para a obtenção de um valor de risco global ou seja, a probabilidade de morte por ano de uma pessoa específica exposta a um risco. Pode ser apresentado através de gráficos de iso-risco, onde linhas que unem pontos com o mesmo nível de risco delimitam zonas classificadas em concordância com esse nível.

O **Risco Expectável** é expresso em termos de número de fatalidades por túnel e por ano, descrevendo assim os casos de acidentes mortais de um túnel nas suas condições normais de operação. Refere-se não a um utilizador específico mas ao conjunto dos utilizadores que entram no túnel.

O **Risco Social** é a relação entre a frequência e o número de indivíduos afectados por um determinado dano pela realização de uma actividade; expressa-se por uma frequência acumulada e refere-se à disposição da sociedade em considerar aceitável a realização de uma actividade.

$$F = P(R_m \geq N) \quad (2)$$

É a probabilidade de que o número de vítimas mortais iguale ou exceda um dado valor N (relativo à medida das consequências do acidente) num túnel (ou troço de túnel) num ano. Esta função é amplamente denominada como curva F-N, modo mais comum de relacionar a frequência/probabilidade de um acidente com a sua severidade. Realça a percepção da sociedade para o risco de acidente o que tem implícito uma maior sensibilidade para riscos de acidente com múltiplos mortos num acontecimento só, os conhecidos eventos de “baixa frequência – grandes consequências” que são uma das situações que maior investigação suscita nesta área, sendo igualmente uma das grandes motivações deste trabalho. Enquanto um evento de baixa probabilidade de ocorrência pode representar um risco de valor baixo para um indivíduo a ele exposto, o valor desse risco pode aumentar ao ponto de se tornar inaceitável se houver um largo número de pessoas expostas. Esta característica está bem representada na imagem 2.7 na qual, para valores de risco individual (IR) iguais, o risco social (SR) é muito maior na situação que tem maior número de pessoas a ele sujeitas.

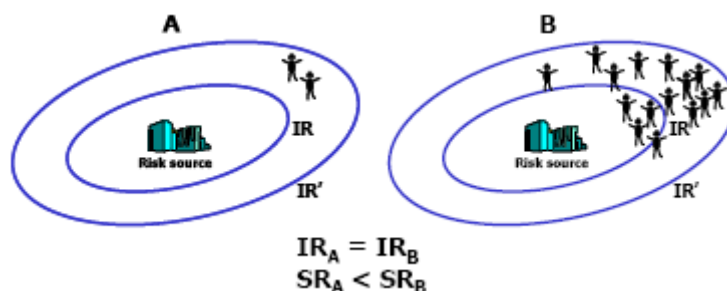


Fig.2.7 – Risco Social [11]

Apresentados que estão os conceitos de risco mais importantes no âmbito deste estudo, foca-se, agora, a atenção nos limites a que esse risco deve obedecer, mais especificamente à investigação levada a cabo e que sustenta a fixação de tais umbrais. O grande desafio dos esforços desenvolvidos pela comunidade científica neste sentido é o de perceber qual o nível de risco que é suficientemente baixo para garantir um nível de segurança aceitável. A objectividade requerida por tal objectivo indica que essa avaliação deve ser essencialmente baseada em premissas probabilísticas como produto de análises quantitativas. Assim, os valores limite praticados fundamentam-se, para qualquer um dos tipos de risco apresentados, num simples conceito que consiste num limiar superior e inferior para o risco, para além dos quais este se torna inaceitável ou negligenciável, respectivamente. A inaceitabilidade do valor do risco conduz, forçosamente, à aplicação de medidas redutoras do mesmo, enquanto a sua localização na zona negligenciável apenas requer uma monitorização periódica para assegurar que o risco se mantém nesse nível. Já a zona que medeia os dois limiares é conhecida como ALARP – As Low As Reasonably Possible e um risco situado neste intervalo ainda implica a consideração de medidas alternativas de abaixamento do nível de risco. Tais medidas deverão ser introduzidas se uma

ponderação com as condições técnicas e de custos relativas à sua operacionalização revelar vantagens. A figura 2.8 esquematiza explicitamente o que acaba de ser explicado.

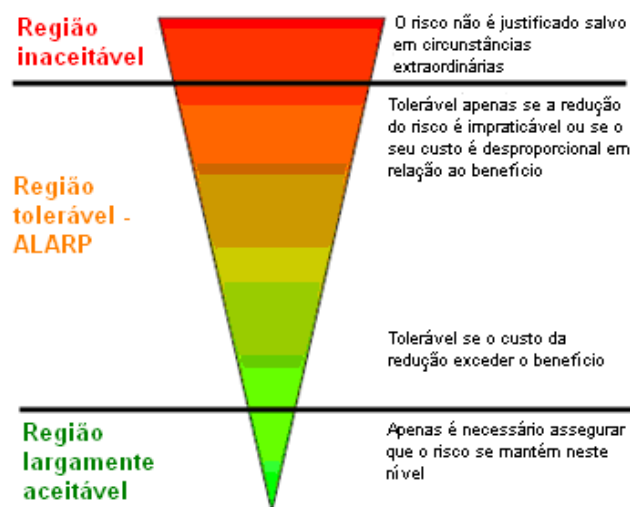


Fig.2.8 – Esquematização da teoria de tolerabilidade do risco [11]

As políticas de risco actuais tendem em avaliar o risco pelo número potencial de mortos que o respectivo perigo representa. No entanto, o conceito de risco envolve variadas dimensões tanto técnicas como não técnicas. As vertentes técnicas enquadram-se nos conceitos de probabilidade e consequência já apresentados. As não técnicas visam uma visão mais subjectiva que tem como principal característica a percepção desse risco

2.3.1.1. Critério de aceitabilidade para o risco individual

No que toca ao risco individual, os critérios de aceitabilidade têm por base o carácter voluntário ou não da actividade de interacção com o túnel de uma pessoa. Podem, segundo este critério, distinguir-se dois grandes planos no perfil de interacção: o plano interno, que inclui os utilizadores e eventuais trabalhadores do túnel; e o plano externo, que abarca as pessoas que vivem nas imediações do túnel. Dadas as diferentes relações com o túnel destes grupos, eles possuem atitudes diferenciadas em relação aos perigos e, por consequência, níveis diferentes de limite de risco devem ser estabelecidos. Assim, neste critério é ponderado o grau de relacionamento que o indivíduo tem com a infraestrutura sob avaliação, bem como o benefício individual associado à opção de correr o risco através do factor β presente na formulação proposta [2]:

$$IR < \beta \times 10^{-4} \text{ por ano} \quad (3)$$

Os valores de β propostos são apresentados no quadro 2.5. Para se tornar mais compreensível a relação entre o risco e o comportamento das pessoas, concretizam-se alguns valores no quadro 6, fazendo-lhes corresponder perfis tipo de atitude perante eles.

Quadro 2.5 - Valores propostos para o coeficiente β de ponderação da relação do indivíduo com o túnel [2]

Agente		β
Interno	Trabalhadores	1
	Passageiro ou usuários	0.1
Externo	Pessoas que vivem ou desenvolvem actividade nas imediações do túnel	0.01

Quadro 2.6 – Perfil de atitude face ao risco [2]

Risco de morte por pessoa e por ano	Atitude
10^{-3}	Tipo de risco não comum. Inaceitável para o público. Quando aparece a sociedade pede por medidas redutoras. Assemelha-se ao risco de cancro do pulmão para fumadores
10^{-4}	Consciência do risco e da necessidade de recursos para o reduzir. Próximo do risco de morte num acidente automóvel ou por acidentes domésticos.
10^{-5}	Apesar de menos que os anteriores, são ainda reconhecidos como riscos. Nível equivalente ao da morte por envenenamento ou por fogo
10^{-6}	Praticamente não são reconhecidos como riscos. Apesar da consciência da sua existência não se espera que ele possa acontecer. Assemelha-se ao risco de electrocussão por um raio.
10^{-7}	Risco totalmente negligenciável. Próximo do risco de ser atingido por um meteorito.

Note-se que, segundo a formulação apresentada, o risco admissível para um agente externo, usando o coeficiente $\beta=0.01$, cifra-se em 10^{-6} que é exactamente o valor para o qual o risco é praticamente não perceptível. Observe-se, na imagem 2.9, a inter-relação que se pode estabelecer entre as propriedades que acabam de ser explicadas.

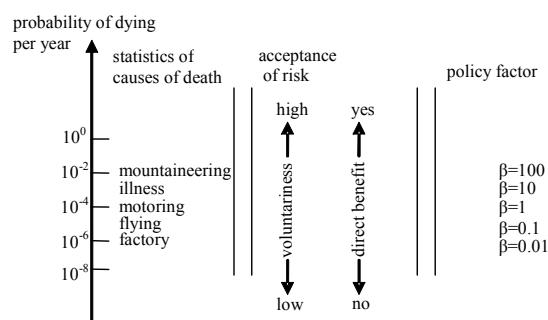


Fig.2.9 – Relação entre as propriedades intervenientes na definição dos limites de aceitabilidade do risco individual

2.3.1.2. Critério de aceitabilidade para o risco social

Para o caso do risco social, como foi anteriormente explicitado, ele é normalmente representado por meio de uma curva de frequências acumuladas (F) versus consequências (N), a curva F-N. Esta transcreve a probabilidade de ocorrerem acidentes que excedam certo número N de vítimas mortais (ou outros danos como feridos, monetários etc.) durante um período de tempo, geralmente um ano. Há algumas considerações matemáticas interpretativas destas curvas que são importantes fazer, tais como:

- A curva nunca é ascendente pois $F(N) \geq F(N+1)$;
- A probabilidade (ou frequência) de ocorrer um acidente com N_1 ou mais mortos é F_1 ; se $N=10$ e $F=10^{-3}$ conclui-se que em cada 1000 anos há um acidente com 10 ou mais mortos;
- $F(N)-F(N+1)=f(N)$, isto é, a diferença entre a frequência de acidentes com N ou mais mortos e a frequência de acidentes com N+1 ou mais mortos é a frequência de acidente com exactamente N mortos;
- A curva representa-se numa escala logarítmica visto que, geralmente, quer F quer N se distribuem por um intervalo normalmente extenso (com várias ordens de grandeza);
- $F(1)$ é a frequência de acidentes com 1 ou mais mortos, logo $F(1)$ é a frequência de acidentes fatais;
- Quanto maior a inclinação da curva F-N maior é a probabilidade de ocorrerem acidentes fatais; quanto mais esticada ela for, mais frequentes são os acidentes com muitos mortos (exemplo: em estrada há mais acidentes mortais do que por avião, no entanto os acidentes de avião são muito mais graves em termos de número de mortos);

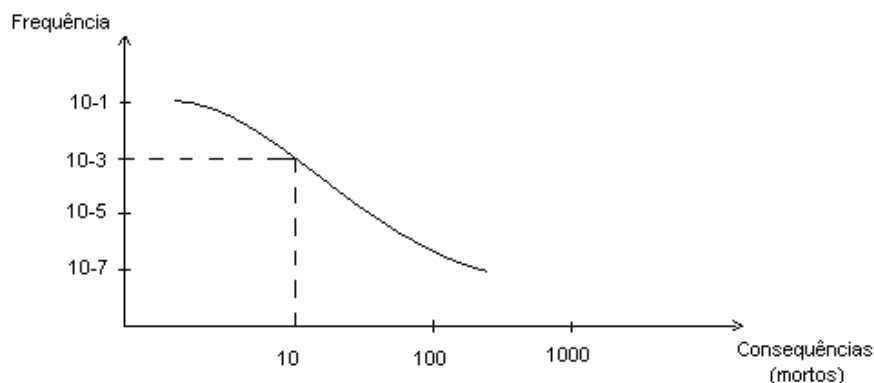


Fig.2.10 - Exemplo de curva F-N

Neste gráfico está também patente o conceito de risco expectável, já que a área por debaixo do gráfico (integral da sua função definidora) iguala esse mesmo risco. No entanto o princípio de risco expectável não é o melhor para realizar a avaliação dos riscos caracterizados por “baixa probabilidade – grandes consequências” pois, para estes casos, o seu valor é geralmente demasiado baixo. Desta forma, encontrar na literatura um método preciso de cálculo do risco não é fácil. Uma das propostas [12] é o denominado valor característico, que afecta o valor esperado ou expectável ($E(N)$) do desvio padrão do número de mortos ($\sigma(N)$, valor em geral bastante elevado) ponderado por um factor de aversão ao risco (k , cujo valor sugerido é 3):

$$E(N) + k \times \sigma(N) \quad (4)$$

Os critérios limitativos são também alvo de diversificadas teorias, não havendo uma grande unanimidade quanto à sua aplicação. Resumindo brevemente algumas das propostas encontradas, destacam-se aquelas que parecem ser mais relevantes.

A primeira limita o risco social com base na mesma perspectiva encontrada para o risco individual, usando o mesmo factor β multiplicado por 100. A tradução deste limite para um critério estandardizado vem na mesma linha teórica dos critérios que de seguida se destacam. Eles baseiam-se na formulação quadrática usada para inúmeras áreas técnicas e adaptada para túneis com o seguinte aspecto:

$$F \leq A \times N^{-k} \quad (5)$$

Na expressão (5), A é uma constante que determina a posição da curva limite, N é a medida da consequência em mortos, e k é um parâmetro normalmente compreendido entre 1 e 2 [12] que define a inclinação da curva. Note-se que A representa a frequência acumulada para $N=1$, pelo que corresponderá à ordenada na origem da curva definidora do critério de risco social. Muitas são as propostas na literatura para a configuração dessa curva, concretizando valores diferentes para A e k . As mais comuns são numericamente enunciadas abaixo e representadas no gráfico:

- (1) Limite superior moderado: $A=0.1$ e $k=1$, aplicado no Reino Unido e na Áustria [18][19];
- (2) Limite superior severo: $A=0.01$ e $k=1$;
- (3) Nível intermédio: $A=0.1$ e $k=2$, aplicado em alguns túneis na Holanda;
- (4) Limite inferior moderado: $A=0.01$ e $k=2$, introduzido por [19], com aplicação na Áustria;
- (5) Limite inferior severo: $A=0.0001$ e $k=1$, idem.

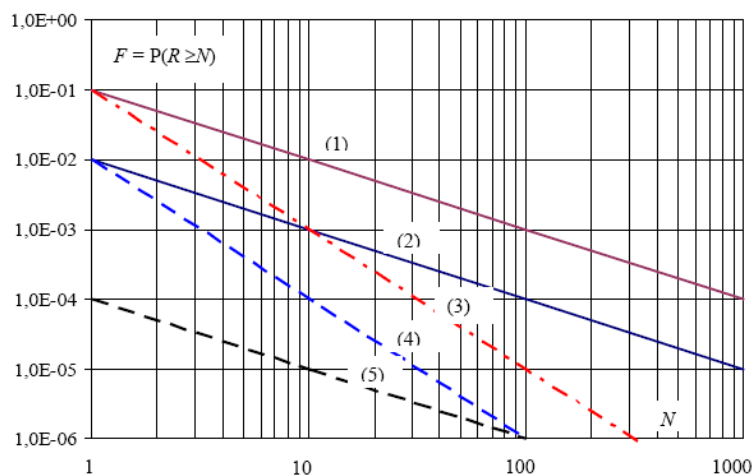


Fig.2.11 – Diferentes limites sugeridos na literatura para o Risco Social [12]

Importante mencionar que, em muitos casos, o estudo que está por trás da definição dos limites para o risco social levado a cabo por comités nacionais e internacionais constituídos para esse efeito, têm por base princípios simples tais como a limitação do risco em túneis para níveis comparáveis ao risco em estradas abertas, para limites superiores, e, para limites inferiores, fazer equivaler esse limite ao do risco de ser atingido por um raio. Noutros casos, adopta-se um princípio de proporcionalidade traduzido pela igual valorização de todas as vidas, i.e. a frequência tolerável para um incidente que cause 10 mortos deve ser um décimo da frequência tolerável para um acidente de apenas 1 morto –

princípio de “aversão ao risco”, traduz-se pela adopção de um factor $k=2$ [12]. A adopção de $k=1$ pressupõe a igual aceitação de 10 acidentes com 1 morto cada e de 1 acidente com 10 mortos. Adicionalmente, neste caso, o limiar de frequência iguala A/N , ou seja, para uma dada frequência total acumulada A a frequência limite é inversamente proporcional ao número de mortos N .

Uma vez escolhidos os limites superiores e inferiores ficam definidas as já referidas 3 zonas do critério de aceitabilidade. Acima do limite superior é a zona de risco inaceitável, que obriga a introdução de medidas para o reduzir; Entre as rectas do limite superior e inferior é a zona de risco tolerável se o custo de redução de risco exceder o benefício; A zona abaixo do limite inferior é a zona de risco aceitável, que exige apenas um acompanhamento para garantir que o risco se mantém neste nível.

2.3.1.3. Critério para o risco economicamente aceitável

Como nota introdutória às questões da optimização de custo, comece-se por se chamar o princípio ALARP já apresentado em 2.3.1. Como aí foi explicitado, este princípio teórico define uma região em que o risco é aceitável mas na qual não deve, ainda assim, ser descurada a necessidade de o baixar. Poder-se-ia pensar, induzido pelo nome dado a essa região do gráfico (As Low As Reasonably Possible – Tão baixo quanto racionalmente possível), que um nível de risco aí localizado já se encontrava no seu valor mínimo e por isso nenhuma medida seria necessário tomar. Esta é uma concepção errada do que significa a região ALARP. De facto, e pelo contrário, a localização gráfica do nível de risco nessa área, implica a aplicação de medidas redutoras até que, efectivamente, esse mesmo risco se torne ALARP, i.e. o tempo, recursos e custo requeridos pela adição de mais uma medida mitigadora são irrazoavelmente desproporcionados em relação ao decréscimo adicional de risco obtido. Matematicamente, atinge-se o ALARP quando:

$$C_{imp} = \frac{C_{liq}}{Pot_{salv}} \quad (5)$$

onde C_{imp} é o custo implícito de evitar mais uma morte, C_{liq} o custo líquido da medida redutora adoptada (dado pelo custo da medida subtraído da redução nos danos da mesma) e Pot_{salv} o potencial de salvamento de uma vida [13].

As explicações seguidamente expostas para a integração do risco económico no procedimento e análise de risco em túneis partem desta consideração inicial, desenvolvendo e debatendo algumas questões relacionadas. É uma abordagem forçosamente genérica sobre este tópico, já que não há qualquer unanimidade científica a este respeito, sendo que poucos países integram de forma preponderante este tipo de análise para o caso dos túneis. Um dos países que mais se debruça sobre este campo de análise é a Holanda, com vários estudos nesta área e um amplo debate em torno da sua aplicação prática. É sobre um modelo Holandês que se baseiam as reflexões aqui apresentadas.

Assim, pode entender-se o paradigma do nível aceitável de risco sob o ponto de vista de uma abordagem económica, como um problema de decisão económica. De acordo com os princípios de optimização económica, os custos totais num sistema (C_{tot}) são determinados pela soma dos gastos dispendidos na obtenção de um sistema mais seguro (I , de investimento) e do valor expectável do dano económico causado por um acidente ($E(D)$). No **ponto de situação económica óptimo** os custos totais no sistema são minimizados:

$$\min(C_{tot}) = \min(I + E(D)) \quad (6) [13]$$

Sabendo que I e $E(D)$ dependem da probabilidade de falha do sistema, pode determinar-se qual a probabilidade óptima de falha do mesmo. Nos túneis, os investimentos são feitos com o objectivo de reduzir (ou mitigar) o dano D . Esse dano, do ponto de vista económico, consiste nas perdas directas de construção do túnel e suas instalações (i.e. os investimentos para a sua reconstrução após acidente) e nas perdas indirectas devidas aos danos na economia de transportes (perda do percurso de ligação do qual o túnel faz parte). Possuindo conhecimento sobre as probabilidades de acidente pode ter-se uma ideia, mais ou menos precisa, do valor desse dano económico esperado e, consequentemente, do **nível económico óptimo de protecção e segurança**. Adicionalmente, deve ter-se sob permanente controlo se o projecto gera ou não benefícios para a sociedade. O mesmo é dizer que é necessário controlar se os custos na **situação óptima** são inferiores aos custos no **ponto de situação económica óptimo**.

Na segurança em túneis, uma das mais importantes propriedades a estudar é o potencial de perda de vidas dos cenários considerados. A transposição para a avaliação económica desta propriedade implica a valorização da vida sob este ponto de vista. Esta não é uma questão consensual pois largas franjas da sociedade considera a vida como um valor incalculável/indeterminável, o que pode levantar inúmeras questões éticas e morais. No entanto, e como se poderá perceber, não ter em conta o valor económico da perda da vida leva a valores expectáveis do dano menores e, por arrasto, a inferiores níveis óptimos de segurança. Tal pode querer dizer que não se está do lado da segurança no planeamento de medidas redutoras de risco porém, a importância da valorização da vida na análise económica ainda não está totalmente entendida. A fórmula (7), apresenta a introdução da questão da vida na formulação de minimização de custos vista em (6). Assumindo que um determinado cenário resulta em N mortos e que cada vida tem o igual valor de d , o ponto de situação económica óptimo vem:

$$\min(C_{tot}) = \min(I + E(D + N \times d)) \quad (7) [13]$$

Muitas vezes, em análises determinísticas ou na vertente determinística de um processo de avaliação global de risco – estes processos, como foi referido anteriormente, devem conter as duas componentes, probabilística e determinística - levanta-se o problema da escolha de cenários representativos. Essa escolha pode ser realizada tendo por base a teoria de optimização económica descrita, com algumas derivações e pressupostos. Assuma-se que num túnel onde um determinado acidente pode acontecer com a probabilidade p_1 e que esse acidente causa os danos D_1 . No cálculo do risco económico é essencial entrar com um rácio de actualização de custos r , definido pela subtracção entre a taxa de juro real (r') e a taxa de crescimento económico (g). Assuma-se ainda que os investimentos crescem linearmente com o logaritmo negativo da probabilidade do acidente ($-\ln(p_1)$) à razão de I'_1 . Os custos totais serão então:

$$C_{tot} = I'_1 \times (-\ln(p_1)) + p_1 \times \frac{D_1}{r} \quad (8) [13]$$

Ao igualar-se a zero a derivada dos custos totais em relação à probabilidade de ocorrência (minimização de custos), obtém-se a probabilidade óptima de falha do sistema, que é aquela que o cenário representativo deverá ter:

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial p_1} = 0 \Leftrightarrow p_{opt} = I'_1 \times \frac{r}{D_1} \quad (9) [13]$$

De notar que esta é uma concepção teórica para escolha do cenário representativo que apresenta algumas limitações práticas, essencialmente no que concerne ao pressuposto da variação regular da função de investimento. Facilmente se percebe que este pressuposto é pouco real. Basta pensar que as medidas de redução têm custos muito variáveis e que, se a opção recair numa medida de alto custo

(construção de um segundo tubo no túnel, e.g.), os custos aumentam exponencialmente. Para contrariar estas limitações propõe-se uma limitação inicial do custo de medidas adicionais em percentagem do custo total e ter explicitamente em conta a eficácia dessas medidas (relação custo – eficácia).

No que a esta **relação custo – eficácia** diz respeito, é importante tecer algumas considerações finais. A relevância desta relação na análise de risco em túneis reside na indiscutível utilidade que tem o potencial de redução de perda de vidas como factor avaliador de alternativas conducentes à redução do risco. Esse potencial pode traduzir-se na actuação sobre as probabilidades dos acidentes (vertente localizada a montante no sistema) ou na actuação sobre as consequências desse acidente (vertente localizada a jusante no sistema). Já afluído na parte inicial do presente subcapítulo, a abordagem que relaciona o custo de uma vida humana com o investimento feito para reduzir o número de mortes, pode formular-se através do conceito do custo de evitar uma vida extra (CSX, do ponto de vista estatístico, relacionado com a redução do valor expectável de mortes):

$$CSX = \frac{I}{\Delta E(N)} \quad (10) [13]$$

Generalizando esta fórmula de acordo com o enunciado na fórmula (4) sobre o valor característico, vem:

$$CSX = \frac{I}{\Delta(E(N) + k \times \sigma(N))} \quad (11) [13]$$

Estas formulações devem ser aplicadas no âmbito de um processo de decisão com o objectivo de escolher quais as medidas redutoras que podem ser alcançadas e aplicadas a um custo razoável – remete-se, novamente, para o aludido sobre o ALARP. Visto que essas medidas têm subjacente um nível de risco (menor) que introduzirão no sistema, a determinação da eficácia respectiva deve ser feita com base em estudos probabilísticos, pesando o seu custo com a redução de risco de que são causadoras. A relação típica entre investimento e risco está representada na figura 2.12, com a ressalva de que, na prática, a linha não seria contínua mas com patamares.



Fig.2.12 – Relação entre investimento em medidas de segurança e o nível de risco resultante [13]

2.3.1.4. Apresentação do critério de avaliação “Knock-Out Criteria – EuroTAP”

Este subcapítulo tem como objectivo a apresentação de um método concreto de avaliação de túneis. O método escolhido é aquele que foi utilizado pelo *European Tunnel Assessment Programme*, EuroTAP, entre 2005 e 2007, num amplo estudo de avaliação da segurança em túneis que implicou 152 túneis de

18 países Europeus. Foi um estudo levado a cabo com o propósito de ser uma auditoria de segurança pelo que, o método de avaliação empregue – o *knock-out criteria* – não constitui um critério estruturado para tomada de decisão do ponto de vista das empresas que gerem túneis. É sim um critério de avaliação externa que pode, no entanto, ser adaptado como instrumento de apoio a tomada de decisões. A avaliação externa torna-se importante na medida em que, com a publicação de resultados, tem um papel persuasivo nos utilizadores (torna-os mais conscientes da segurança) e nos operadores (alertando-os para a importância da tomada de medidas que conduzam a um melhoramento dos níveis de segurança) [21].

O EuroTAP, ao conduzir um estudo comparativo desta ordem de grandeza, propôs-se a criar uma metodologia de avaliação aplicável a toda a Europa, na qual os resultados pudessem ser directamente comparados para todos os túneis inspeccionados. Este era, de facto, o objectivo-chave a cumprir, a mais difícil e dispendiosa (em tempo) finalidade a atingir. Assim, muitos recursos foram direccionados para a análise profunda dos vários cenários legais em vigor nos países alvo e da Directiva Europeia, na busca de um critério uniforme e transversal a todas essas diferentes realidades. A necessidade de aplicação de métodos quantitativos (rigor) teria que ser combinada com a simples e flexível aplicabilidade mais característica de métodos qualitativos. Porquanto, o método sustenta-se na avaliação dos túneis com base no seu **potencial de risco** e no seu **potencial de segurança**, ponderando-os no cálculo de um valor (nota) final que reflecte as características individuais de cada túnel, válida no contexto de uma escala qualitativa abrangente.

O potencial de segurança cobre as medidas de segurança associadas à estrutura, ao equipamento e à organização do túnel. Foram seleccionadas 8 categorias de acordo com os mais importantes critérios de avaliação, que se desenvolvem em vários subtópicos de características/propriedades a avaliar. Cada uma dessas categorias foi, de seguida, hierarquizada por um rácio de acordo com a sua importância no sistema global. As categorias e respectivos rácios são:

▪ Sistema do túnel (número de tubos, largura das faixas, geometria etc.)	14.1%
▪ Iluminação e fornecimento energético	7.5%
▪ Tráfego e seu controlo (congestões, limites de velocidade)	17.2%
▪ Comunicação (altifalantes, telefones de emergência)	10.8%
▪ Rotas de escape e salvamento (distância entre saídas de emergência)	13.2%
▪ Protecção de incêndio (na estrutura, nos cabos, alarmes, extinção etc.)	18.0%
▪ Ventilação (normal, de emergência, longitudinal, transversal)	11.4%
▪ Gestão das emergências (planos de resposta, interligação dos sistemas)	7.8%

Com base neste princípio de ponderação é então dada uma pontuação a cada medida individualmente (15 a 30 medidas são, por norma, consideradas em cada categoria). A máxima pontuação possível varia de acordo com a importância da medida. Para propriedades relacionadas com medidas ou distâncias a pontuação é dada com base numa interpolação linear entre um valor limite superior correspondente à máxima pontuação, o mais restrito dos presentes nas legislações nacionais a esse respeito, e um valor limite inferior correspondente à pontuação nula, o máximo permitido na Directiva Europeia se presente ou por estimações técnicas. Pode ainda haver medidas em que é aplicado apenas o critério Sim/Não, sendo dada a pontuação máxima se o critério verificar e zero para a não verificação. É tido em consideração o facto de poder haver medidas alternativas que produzam os

mesmos efeitos ao nível da segurança, sendo que para tal são estudadas e observadas um alargado leque de possíveis medidas.

O potencial de risco, por seu turno, é quantificado pelo peso relativo dos parâmetros que mais influenciam (inflacionam ou aliviam) o nível de risco presente. Posto que as análises quantitativas de risco foram levadas a cabo para túneis apenas recentemente, tendo sido generalizadas apenas com a imposição da Directiva Comunitária, as bases de dados de incidentes não têm ainda longo prazo suficiente para serem estatisticamente significativas. Assim, de forma qualitativa e quantitativa, com base em inspecções apropriadas e experiência ganha noutros túneis, foram seleccionados os seguintes parâmetros e respectivos pesos (*risk points* – RP) para o potencial de risco:

▪ Performance anual do tráfego (volume de tráfego e extensão do túnel)	0 a 8
▪ Rácio de veículos pesados (HGV) por dia e tubo	0 a 8
▪ Tipo de tráfego (uni ou bidireccional)	1 a 8
▪ Densidade de tráfego (veículos por dia e por faixa)	0 a 5
▪ Transporte de substâncias perigosas	0 a 5
▪ Gradiente máximo do túnel	0 a 3
▪ Riscos adicionais (entradas e saídas, intersecções, inundação)	0 a 3

A classificação é dada com base no somatório de pontuação obtida e classificada em concordância em Risco Muito Baixo (1 a 9 pontos), Risco Baixo (10 a 14 pontos), Risco Médio (14 a 21 pontos), Risco Alto (22 a 28 pontos) e Risco Muito Alto (mais de 28 pontos). Consoante a pontuação obtida, é-lhe associado um factor de bonificação (ver figura 2.13) para considerar o facto de que túneis com menor potencial de risco não necessitam de prescrever altos requisitos de segurança.

A pontuação final é, então, dada relacionando o potencial de segurança e o potencial de risco através do factor de bonificação. Este factor varia de 0.6 (para 1 RP) a 1.0 (para 29 ou mais RP's).

$$Pontuação = \frac{Pot_{seg}}{Factor_{bonif}} \quad (12)$$

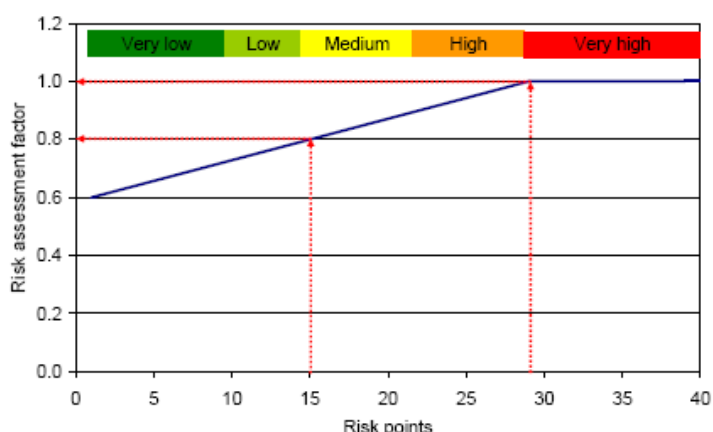


Fig.2.13 – Gráfico para determinação do factor de bonificação [14]

O resultado é depois classificado por meio de uma escala com 5 níveis:

- Muito Bom $\geq 90\%$
- Bom $\geq 80\%$
- Aceitável $\geq 70\%$
- Fraco $\geq 60\%$
- Muito Fraco $< 60\%$

É de grande relevância salientar que o critério do EuroTAP foi construído com as fundamentações dos regulamentos legais nacionais e da Directiva da UE. Assim, garante-se que qualquer túnel avaliado por este sistema que esteja de acordo com os requisitos exigidas pelo quadro legal Europeu, têm garantida uma classificação mínima de aceitável.

Convém ainda notar que a grande desvantagem deste sistema puramente aditivo reside no facto de uma classificação muito fraca numa categoria poder ser compensada noutra e, com isso, ter reduzida ou nula influência na classificação final. Para reduzir esta desvantagem foi, posteriormente, introduzido um factor corrector denominado *downgrading* que considera uma redistribuição dos pesos relativos de cada categoria de segurança com base na sua influência em cada uma das etapas do processo de acidente (prevenção, detecção, escape, gestão do acidente, ver figura 2.8).

Como apontamento final, a tabela 2.7 resume os resultados do estudo.

Quadro 2.7 – Quadro resumo dos resultados do estudo do EuroTAP [14]

Classificação	2005	2006	2007	Total	
				Número	Percentagem
Muito Bom	18	22	18	58	38
Bom	14	9	11	34	22
Aceitável	9	8	12	29	19
Fraco	4	5	3	12	8
Muito Fraco	4	8	7	19	13
Total	49	52	51	152	100

3

O TRANSPORTE DE MERCADORIAS PERIGOSAS EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende ser um aprofundamento científico da teoria de análise de riscos vista nos capítulos anteriores para o caso específico do transporte de materiais perigosos em túneis. Através de uma análise intensiva e de um estudo rigoroso das especificidades, principais métodos e diferentes abordagens, pretende-se, no âmbito do presente capítulo, não só estruturar de forma inteligível as mais relevantes decorrências teóricas do tema, mas também preparar e fundamentar a aplicação prática a realizar em capítulo posterior.

O tráfego nos túneis, em particular o tráfego de veículos pesados de mercadorias (HGV, do inglês Heavy Good Vehicles), está continuamente a aumentar ao longo dos anos mercê, em larga medida, da afirmação da indústria química como importante ramos do sector industrial e consequente incremento em número e diversidade das matérias perigosas transportadas. Como foi abordado no primeiro capítulo, há que adicionar a este facto um outro relacionado com o cada vez mais frequente recurso a soluções de estrada em túnel pelas sua crescente eficácia na resposta às exigências orográficas e, mais recentemente mas com grande relevância, em travessias urbanas. O estado da arte realizado no capítulo 2 permite perceber que tanto no que toca a construção como à segurança operacional, os túneis têm sido alvo de melhorias firmes. Todavia, os problemas levantados pelo transporte de mercadorias potencialmente perigosas não foram, ainda, objecto de avanços satisfatórios e permanece um elemento de estudo de indubitável importância.

Embora pouco provável, um incidente que envolva matérias perigosas no interior de um túnel pode ser muito destrutivo em vidas humanas, ambientalmente, estruturalmente e em termos de tráfego. Por outro lado, medidas redutoras de risco desnecessárias relacionadas com a proibição do transporte de mercadorias perigosas geram custos económicos injustificados e desviam o trânsito desse material para rotas ainda mais perigosas, como áreas densamente povoadas, o que acaba por aumentar o risco global.

Até ao final da década de 90, as regras e regulações para o transporte de materiais perigosos variavam consideravelmente de país para país e até mesmo dentro de um mesmo país. Na maioria dos casos não existiam regras gerais ou regulamentos aplicáveis a todos os túneis a nível nacional, sendo a responsabilidade de definição dessas mesma regras das autoridades regionais ou dos concessionários dos túneis. A falta de um sistema uniforme de regulação era, em larga escala, o resultado da limitada existência de ferramentas de análise e avaliação de riscos e tomada de decisão. Nesta medida, várias

foram as iniciativas de cariz científico e legal que abordaram o problema do transporte de materiais perigosos em túneis do ponto vista de proceder a uma harmonização de métodos e processos, na sequência do que já havia sido referido no capítulo 1 e 2. De facto, estes grupos de trabalho articularam-se no âmbito dos projectos de investigação aí referidos. Um dos mais destacados trabalhos nesta área foi levado a cabo por um grupo formado pelo PIARC e OECD. Com o objectivo de facilitar o planeamento e organização do transporte de mercadorias perigosas desenvolveu, não apenas um sistema de classificação uniforme, mas todo um processo integrado de análise de risco e de tomada de decisão sobre medidas redutoras de risco com base em ferramentas informáticas que aplique as melhores recomendações e práticas subjacentes ao tema. Serve este capítulo para apresentar, de um modo genérico, o problema e as questões mais indispensáveis do transporte de mercadorias perigosas, focando atenções e aprofundando o entendimento da abordagem desenvolvida pelo PIARC/OECD.

3.2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

Antes de se avançar para o estudo aprofundado das abordagens possíveis ao problema em questão, é interessante começar por enquadrá-lo com alguns dados técnicos e legais relevantes para a sua compreensão global.

3.2.1. ESTUDO SOBRE ACIDENTES EM TÚNEIS COM GRANDES INCÊNDIOS

O projecto do PIARC envolveu, na sua fase inicial, um estudo de recolha de informações relativas a acidentes ocorridos em túneis cuja consequência tenha sido a deflagração de incêndios de grandes dimensões. O estudo incluiu 33 incidentes de incêndios em túneis desde 1949 envolvendo veículos pesados de mercadorias (HGV's) ou acidentes com múltiplos carros veículos, e procurou um conjunto homogéneo de detalhes a partir dos quais pudessem ser tiradas informações coerentes. Os incêndios foram divididos em 4 grupos, de acordo com as suas características [15]:

- Tipo A - Incêndios envolvendo gasolina, gás e bissulfato de carbono (4 incêndios);
- Tipo B - Incêndios envolvendo produtos plásticos e outros produtos à base de petróleo – 7 incêndios;
- Tipo C - Incêndios que tenham causado danos pessoais (sem serem A nem B) – 11 incêndios;
- Tipo D - Outros incêndios envolvendo veículos pesados de mercadorias, autocarros, e múltiplos carros – 11 incêndios.

Os resultados do estudo relativamente aos fogos do tipo A, B e C encontram-se resumidos na tabela 3.1 (esta tabela funciona em parte como um aprofundamento dos dados registados na tabela 1.1, aí de forma mais simplista). Nos 33 incêndios cobertos por este estudo, morreram 103 pessoas, 101 ficaram feridas e 139 sofreram inalação de fumos. Adicionalmente, 8 autocarros, aproximadamente 200 HGV's, perto de 150 carros privados e 15 outros veículos foram destruídos pelo fogo. Muitas mercadorias foram destruídas sendo que, muita dela, não é considerada mercadoria perigosa. Ainda numa análise prévia, observa-se que em 13 casos, incidentes de tráfego foram relatados como causa., todos envolvendo mais que um veículo. Problemas no veículo foram a causa para 18 dos 33 incidentes (defeitos no motor, falha de travões, falha na caixa de velocidades e problemas com os pneus). Num caso houve um derrame de uma cisterna de combustível e noutro a causa foi desconhecida. Em 20 casos o fogo começou em veículos pesados. A maioria dos fogos teve uma duração entre uma e cinco horas. Um caso durou 53 horas (Mont Blanc) e outro manteve-se activo durante 4 dias.

Quadro 3.1 – Resumo dos fogos estudados [15]

Fire type	Tunnel name	Country	Tunnel length (m)	Date of fire	Cause of fire	Duration of fire	Goods burned	People killed	People injured
A	Holland	United States	2 567	13.05.1949	Goods	4 hrs	Carbon bisulphate	0	0
A	Chesapeake Bay	United States		03.04.1974	Tyre	4 hrs	Gasoline	0	1
A	Caldecott	United States	1 083	07.04.1982	Collision	3 hrs	33 000 l gasoline	7	2
A	Isola delle Femmine	Italy	148	1993	Collision		Gas road tank vehicle	5	20
B	Tauern	Austria	6 400	29.05.1999	Collision	15 hrs	Paint	12	0
B	Frejus	France	12 870	05.05.1993	Motor	2 hrs	Plastics	0	0
B	Porte d'Italie	France	425	11.08.1976	Motor	45 mins	Polyester	0	0
B	Moorfleet	Germany	243	31.08.1969	Tyre	2 hrs	Polyethylene	0	0
B	Hovden	Norway	1 283	13.06.1993	Collision	2 hrs	Polyethylene	0	5
B	Guadarrama	Spain	2 870	14.08.1975	Gearbox	3 hrs	Pine resin	0	0
B	Blue Mountain	US	1 302	1965	Motor		Fish oil	0	0
C	Pfänder	Austria	6 719	10.09.1995	Collision	1 hrs	Bread	3	0
C	Mt Blanc	France	11 600	24.03.1999	Motor	53 hrs	Margarine, flour	39	0
C	L'Arme	France	1 100	09.09.1986	Collision			3	5
C	Peccorilla Galleria	Italy	662	1983	Collision		Fish	9	20
C	Serra Ripoli	Italy	442	1993	Collision	3 hrs	Paper	4	4
C	Kajiwara	Japan	740	17.04.1980	Collision	2 hrs	Paint	1	0
C	Nihonzaka	Japan	2 045	11.07.1979	Collision	4 days		7	3
C	Sakai	Japan	459	15.07.1980	Collision	3 hrs		5	5
C	Velser	Netherlands	768	11.08.1978	Collision	2 hrs	Flowers, soft drinks	5	5
C	Huguenot	South Africa	4 000	27.02.1994	Gearbox	1 hrs		1	28
C	Gumefens	Switzerland	343	1987	Collision	2 hrs		2	3

As principais conclusões a retirar, apesar da amostra ser diminuta para que as conclusões sejam estatisticamente relevantes, consistem, em primeiro lugar, na grande proporção de incidentes mortais quando em comparação com outro tipo de acidentes. Esta constatação é consistente com a ideia já anteriormente expressa de que os acidentes em túneis são um específico e particularmente sério problema ao nível das consequências. Note-se, no entanto, que os acidentes por colisão representam menos de 50% do total dos fogos, sendo a maior parte causada por problemas com o próprio veículo.

Para reduzir o número de fogos em túneis tem, num primeiro plano que se actuar no potencial de ocorrência de acidentes e, no caso de a ocorrência se verificar, ela deve ser gerida com a maior rapidez e experiência possíveis. Muitos dos problemas verificados nos veículos parecem ter origem na condução ao longo de longas e íngremes rampas a grandes altitudes. Isto representa um grande problema principalmente para os HGV pelo que medidas que actuem nesta área parecem essenciais (instalação de dispositivos de auto-extinção de fogo nos HGV, inspecção regular e construção de áreas de paragem ao longo das estradas para descanso dos condutores e resfriamento do motor).

A análise dos dados reunidos parece ainda apontar no sentido da crucial importância de existirem responsabilidades claramente definidas na gestão dos túneis, em particular na gestão dos cenários de emergência já que isso tornaria mais rápida e eficaz a intervenção das equipas de salvamento e, por consequência, minimizaria os danos dos fogos. Isto consegue-se com planos de emergência bem estruturados e treinos específicos do pessoal. Mais se torna evidente esta necessidade quando os dados deixam transparecer que muitos condutores não sabem o que fazer em caso de incêndio, mesmo em túneis equipados com dispositivos de extinção, há um desconhecimento quanto ao modo de os usar. Torna-se assim muito importante realizar acções de educação e sensibilização direccionadas aos condutores de HGV's, medida que, pelas razões enunciadas, se pode tornar bastante eficaz.

O relatório discute ainda a eficácia dos pulverizadores dos sistemas de extinção de incêndios e os procedimentos das equipas de bombeiros, sobre a sua intervenção em incêndios de materiais perigosos ou desconhecidos, dado o perigo que isso pode representar. Os dados, no entanto, não permitem retirar conclusões congruentes quanto a estas questões (seria expectável que os fogos com mercadorias perigosas representassem um problema de maior dimensão do que aquela que apresentaram no estudo – apenas 4 fogos nestas circunstâncias).

3.2.2. ESTUDO SOBRE O ESTADO DA LEGISLAÇÃO

Com o objectivo de perceber a necessidade do desenvolvimento de medidas harmonizadas para intervir sobre o risco gerado pelo transporte de mercadorias perigosas em túneis, o PIARC juntamente com a OCDE levou a cabo um outro trabalho com a finalidade de fazer uma colecta do espectro das legislações e práticas nacionais em vigor em matéria de transporte de matérias perigosas por túneis (tema já aflorado no quadro 2.1 do segundo capítulo). O estudo recaiu sobre informações provenientes de 21 países, com aprofundamentos de informação em 9 deles. A finalidade foi a de examinar os túneis rodoviários existentes, regulamentos e políticas de transporte de matérias perigosas em vigor e perceber que problemas poderiam daí advir para o processo de tomada de decisão, praticabilidade das leis, operação e transporte, construindo assim um suporte para a evolução futura dessas leis com base nas recomendações feitas.

As definições do que são matérias perigosas no âmbito do seu transporte rodoviário estão, em larga medida, uniformizadas. Na Europa vigoram os códigos ADR (*European Agreement on the Transport of Dangerous Good*) e nos outros países sob a atenção deste estudo há um alinhamento segundo o sistema das Nações Unidas (*Global Harmonized System, GHS*). Pelo contrário, e como foi já previamente referido, não há qualquer homogeneidade na definição legal entre os países em matéria da admissibilidade e condições desse transporte, chegando mesmo a haver variações dentro de um mesmo país. De realçar é o facto de nos países com menor número de túneis surgirem regulamentos mais restritos do que nos países ricos neste tipo de infra-estruturas.

À data do estudo, (1995, 1996) a maioria dos países não baseava a sua avaliação sobre restrições ao transporte de material perigoso em processos quantitativos de comparação de riscos mas, isso constituía uma preocupação para os mesmos. Os problemas mais relevantes derivados da legislação existente apontados pelo estudo no que respeita a tomada de decisão, aplicação, operação e transporte foram:

- Prática de permitir diversos túneis para o transporte de mercadorias perigosas em contradição com as regras que prescrevem o contrário como princípio;
- Omissão de orientações para basear decisões em estudos de risco;
- Regulamentos aplicáveis para túneis do estado, não para a generalidade;
- Dificuldade dos condutores de estar alerta dos regulamentos correntes para todos os túneis por que possam passar na sua rota, devido à grande variação de restrições;
- Falta de sistemas de alerta/aviso relativo ao tráfego de materiais perigosos antes da entrada no túnel
- Falta de sinalização nas rotas alternativas aos túneis, quando o trânsito no seu interior é proibido;
- Uso, por parte dos HGV, de rotas potencialmente mais perigosas e não adaptadas devido às restrições impostas.

Percebe-se que muitos destes problemas poderiam ser dominados pela introdução de sistemas de sinalização internacionais, tanto para as restrições como para as rotas alternativas. Assim, vários países desenvolveram planos de melhoramentos e modificações das suas regras, também analisados e aqui resumidos:

- Transferência de responsabilidade de decisão e aplicação legal de um plano nacional para um plano local/regional;
- Regulamentação mais apertada em relação à sinalização em cada túnel e nas rotas alternativas;
- Ajustar regulamentação em túneis de modo a não entrar em conflito com as de estrada aberta;
- Basear as decisões de permissão ou restrição de mercadorias perigosas em comparações quantitativas de risco, fazendo uso da metodologia PRA;
- Introdução de mais ou de novos requerimentos de segurança que possam autorizar o transporte de mercadorias perigosas;

Como foi visto no capítulo 1, a Directiva 2004/54/EC procura colmatar algumas destas lacunas legais, harmonizando processos de segurança com a clarificação de responsabilidades. Introduz igualmente exigências de cariz técnico ao nível das infra-estruturas de segurança com a imposição de mínimos globais níveis de segurança, afectando conjuntos de medidas de mitigação ou redução de riscos em função das características dos túneis.

3.3. CLASSIFICAÇÃO E TIPIIFICAÇÃO DE MERCADORIAS PERIGOSAS

Referiu-se na secção anterior que o código de classificação de mercadorias utilizado na Europa é o ADR. Este é um código uniformizado e que categoriza de forma lógica as mercadorias perigosas sob o ponto de vista do objectivo de as transportar. Neste capítulo pretende-se apresentar genericamente como se organiza esta classificação, com o objectivo de entender os princípios de representatividade que seguidamente serão mostrados.

A classificação ADR consiste, então, em 9 classes de matérias perigosas para o transporte por sua vez subdivididas em subclasses que fazem a distinção com maior detalhe entre os grandes grupos de mercadorias. Para a classe 2, este aprofundamento na caracterização da mercadoria transportada é feito por meio de um código de letras que mais adiante se descreverá. As classes incorporadas no ADR são, então, as seguintes [16]:

- Classe 1 – Substâncias explosivas (subdivisões 1.1 a 1.6), substância sólida ou líquida (ou mistura de substâncias), que por si mesma, através de reação química, é capaz de produzir gás a temperatura, pressão e velocidade tais que possam causar danos à sua volta. Incluem-se nesta definição, as substâncias pirotécnicas mesmo que não desprendam gases;
- Classe 2 – Gases:
 - Inflamáveis (subclasse 2.1) (e.g. GPL, hidrogénio);
 - Não inflamáveis, não tóxicos (subclasse 2.2), são asfixiantes ou oxidantes (e.g. ar comprimido, hélio);
 - Tóxicos (subclasse 2.3), apresentam riscos imediatos para a saúde e vida humanas (e.g. monóxido de carbono);

- Classe 3 – Líquidos inflamáveis, líquidos, mistura de líquidos, ou líquidos contendo sólidos em solução ou em suspensão, que produzem vapores inflamáveis a temperaturas até 60,5 °C em recipiente fechado ou de 65,5°C em recipiente aberto (e.g. acetona, gasolina sem chumbo).;
- Classe 4 – Sólidos inflamáveis:
 - Sólidos inflamáveis (subclasse 4.1), sólidos que, nas condições encontradas no transporte, são facilmente combustíveis ou que, por atrito, podem causar fogo ou contribuir para ele. Esta subclasse inclui ainda, explosivos insensibilizados que podem explodir se não forem suficientemente diluídos e substâncias auto-reagentes ou correlatas, que podem sofrer reação fortemente exotérmica;
 - Substâncias sujeitas a combustão espontânea (subclasse 4.2), sujeitas a aquecimento espontâneo nas condições normais de transporte, ou ao entrar em contato com o ar, sendo, então, capazes de se inflamarem;
 - Substâncias que, em contacto com a água emitem gases inflamáveis (subclasse 4.3);
- Classe 5 – Substâncias oxidantes:
 - Substâncias oxidantes (subclasse 5.1);
 - Peróxidos orgânicos (subclasse 5.2) ;
- Classe 6 – Substâncias tóxicas:
 - Substâncias tóxicas (subclasse 6.1), capazes de provocar a morte, lesões graves ou danos à saúde humana, se ingeridas, inaladas ou se entrarem em contato com a pele (e.g. pesticidas);
 - Substâncias infectantes (subclasse 6.2), contêm microorganismos viáveis, incluindo bactérias, vírus, rickettsia, parasitas, fungos ou um recombinante híbrido ou mutante, que provocam, ou há suspeita que possam provocar, doenças em seres humanos ou animais;
- Classe 7 – Materiais radioativos;
- Classe 8 – Materiais corrosivos, substâncias que, por ação química, causam danos severos quando em contato com tecidos vivos ou, em casos de vazamentos, danificam, ou mesmo destroem outras cargas ou o veículo; elas podem, também, apresentar outros riscos (e.g. ácido sulfúrico).;
- Classe 9 – Substâncias perigosas diversas, que apresentam um risco não abrangido por qualquer das outras classes.

Na classe 2 é frequente aparecer uma letra à frente da indicação da classe. Essa letra ou letras corresponde à subdivisão por propriedades perigosas do material e é realizado do seguinte modo:

- A, asfixiante;
- O, oxidante;
- F, inflamável;
- T, tóxico;
- TF, tóxico, inflamável;
- TC tóxico, corrosivo;
- TO tóxico, oxidante;
- TFC tóxico, inflamável, corrosivo;
- TOC tóxico, oxidante, corrosivo.

O processo de identificação da matéria perigosa transportada subentende assim que seja dada à mercadoria uma classificação dentro destes moldes. Para tal, o código ADR dispõe de uma lista extensa de matérias perigosas e seu respectivo código classificativo. Tal processo fica completo com a identificação, por meio de um rótulo, visível no exterior do veículo da matéria perigosa que se transporta. Uma lista de rótulos e seu significado pode ser observada no Anexo C.

3.4. CLASSIFICAÇÃO HARMONIZADA DE TÚNEIS QUANTO ÀS RESTRIÇÕES DE CIRCULAÇÃO DE PRODUTOS PERIGOSOS

O disposto nas considerações anteriores sobre a variabilidade dos regulamentos no que toca ao transporte de mercadorias perigosas, permite concluir das dificuldades para os transportadores no que toca ao planeamento das viagens. Estes problemas levaram à necessidade de criação de um sistema harmonizado de classificação de túneis quanto às restrições que impelem ao transporte de mercadorias perigosas com um duplo objectivo: para além de facilitar o transporte do ponto de vista da sua organização eliminando barreiras às trocas comerciais internacionais, melhorar a segurança, por via de tornar os regulamentos mais inteligíveis e praticáveis.

Harmonização de regulamentos não significa que os mesmos regulamentos devam ser aplicados a todos os túneis nem mesmo a dois túneis semelhantes em locais diferentes. Significa apenas que os regulamentos devem ser expressos da mesma forma em toda a parte, i.e. para o caso concreto, devem referir-se às mesmas listas de mercadorias perigosas permitidas ou restringidas de passar em determinado túnel. Essas listas comuns, aqui denominadas “grupos de mercadorias perigosas” (ou apenas “grupos”), referem-se não apenas à natureza do bem transportado, mas também à forma como ele é transportado, em grandes contentores ou em cilindros, e eventual presença de diferentes tipos de mercadoria perigosa no mesmo veículo. Assim, a base do sistema proposto assenta no princípio de que os grupos são os mesmos para todos os países. Este sistema não afecta o carácter das decisões tomadas, apenas influencia o aspecto formal de como essas decisões devem ser implementadas.

Genericamente, a ideia principal deste agrupamento classificativo é a de juntar os muitos tipos diferentes de mercadorias consideradas perigosas num número restrito de grupos, partindo do pressuposto de que, pelas suas características, os tipos agrupados são, de facto, aceitáveis de aparecerem juntos. Um sistema com 5 grupos (de A a E), organizados sequencialmente de acordo com as restrições crescentes das mercadorias que permitem, é a proposta. O grupo A, a categoria mais ampla, contém todos os carregamentos autorizados para transporte rodoviário incluindo os mais perigosos. A categoria E, a mais restrita, contém apenas os carregamentos que não exijam uma especial marcação no veículo, ou seja, os menos perigosos. Restrições mais veementes, como a proibição total de mercadorias perigosas, são impossíveis de praticar por parte das autoridades, já que lhes é impossível distinguir as mercadorias menos perigosas das não perigosas sem efectuar uma inspecção no veículo. Todas as mercadorias no grupo E estão incluídas no D, todas as mercadorias do Grupo D estão incluídas no C e assim sucessivamente.

3.4.1. BASES DO SISTEMA PROPOSTO E SUA DESCRIÇÃO

A proibição de mercadorias perigosas não restritas em estradas a céu aberto a atravessarem túneis, só é justificável quando esse atravessamento representa um risco de acidentes graves maior do que aquele que apresentaria numa estrada descoberta. Por acidente grave toma-se aqui, tal como noutras secções deste trabalho já foi explicitado, acidentes que envolvam um potencial de causar alto número de vítimas mortais ou grandes danos para a estrutura do túnel. Isto significa que mercadorias

consideradas perigosas mas que não possuam este potencial de risco não devem ser banidas do atravessamento dos túneis. Assim, o sistema de agrupamento sob estudo propõe uma estrutura que se baseia na assunção de 3 perigos principais potenciais causadores de vítimas ou grandes danos: explosões, fugas de gás tóxico ou líquidos tóxicos voláteis e incêndios. As consequências principais da efectivação destes perigos são, genericamente e por ordem decrescente de magnitude de consequências, as seguintes:

- Nas grandes explosões dois níveis se podem distinguir:
 - Muito grandes explosões, tipicamente de todo um depósito de GPL (Gás de Petróleo Liquefeito) aquecido pelo fogo (BLEVE, *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*), seguido pela formação de uma bola de fogo – *hot BLEVE*; outras explosões poderão ter consequências similares;
 - Grandes explosões, tipicamente explosões de carregamentos de gases não inflamáveis comprimidos aquecidos pelo fogo (BLEVE sem formação de bola de fogo – *cold BLEVE*);

BLEVE, também conhecido por “Bola de Fogo”, é o tipo de explosão que ocorre quando um recipiente que contenha um gás pressurizado em ebulição se rompe ou abre uma brecha. A entrada em ebulição e expansão dá-se por meio da rápida perda de vapores interiores e súbito abaixamento de pressão ou pelo súbito aumento de temperatura exterior induzido ao interior do recipiente. Resulta numa combinação de explosão e incêndio com uma emissão intensa de calor num curto intervalo de tempo. Uma muito grande explosão (*hot BLEVE* ou equivalente) tem consequências drásticas no interior de um túnel; pensa-se que uma explosão desta natureza é fatal para todos os ocupantes do túnel ou, no mínimo, para os ocupantes de uma extensão significativa do mesmo. Já a grande explosão (*cold BLEVE* ou equivalente) tem consequências mais limitadas, especialmente no que respeita à estrutura do túnel. Não há possibilidades de mitigar as consequências de incidentes desta dimensão, particularmente do primeiro caso. O esquema da imagem 3.1 idealiza o conceito de BLEVE numa pequena escala.

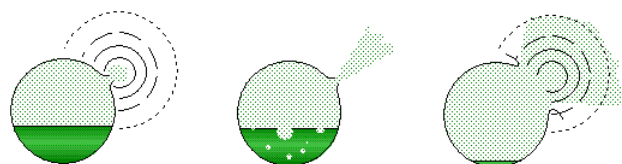


Fig.3.1 – Esquematização do conceito do BLEVE (descompressão, ebulição e explosão) [adaptado de 17]

- As grandes fugas de gás podem ser causadas pelo derrame de um cisterna que o contenha (comprimido, liquefeito ou dissolvido). É um incidente à partida mortal para todas as pessoas nas imediações da fuga e perto da zona para onde a ventilação leva o gás. Parte do túnel pode ser protegida, mas a sua total protecção não é possível;
- Os grandes incêndios dependem da geometria do túnel, do seu tráfego e do equipamento de que dispõe; um incêndio de grandes dimensões terá consequências mais ou menos drásticas, desde um número reduzido de vítimas a dezenas delas.

Com base nestas considerações, o sistema de agrupamento é o seguinte:

Quadro 3.2 – Sistema de grupos proposto [15]

Grupo	Descrição (mercadorias perigosas permitidos)
A	Todos os carregamentos de materiais perigosos permitidos nas estradas abertas
B	Todos os de A excepto aqueles que possam gerar uma muito grande explosão (hot BLEVE)
C	Todos os de B excepto aqueles que possam gerar uma grande explosão (cold BLEVE) ou uma grande fuga de gás
D	Todos os de C excepto que possam gerar um grande incêndio
E	Nenhum tipo de mercadorias perigosas (excepto as que não requerem marcação especial no veículo)

Como se percebe pela análise do quadro 3.2, o grupo C engloba duas das consequências referidas. De facto, poder-se-iam dividir os agrupamentos propostos em 6 divisões. Tal não foi feito porque as cold BLEVE podem acontecer com qualquer um dos gases comprimidos ou liquefeitos, incluindo os que são tóxicos, contribuindo-se assim para o objectivo de redução do número de grupos. Outra questão importante, e eventualmente a de maior relevo no âmbito da presente dissertação, para a aplicabilidade deste método de classificação dos túneis é a sua consistência e coordenação com os métodos de avaliação de risco e de tomada de decisão. Este é um aspecto que será explorado com mais detalhe nos capítulos seguintes. No entanto, é relevante notar desde já que esses métodos, em princípio de cariz quantitativo pelo que anteriormente foi disposto a esse respeito, devem incorporar cenários que se articulem e incluam na representatividade dos grupos aqui definidos, produzindo indicadores de risco com os quais possa ser concordada uma decisão que atribua classificação nos moldes aqui descritos. Mais adiante se mostrará concretizarão as correlações existentes entre o sistema de classificação de túneis e o processo de análise de risco, evidenciando este subcapítulo 3.4 como um elo de ligação entre os planos legislativo e de aplicação prática/tomada de decisão.

3.5. O MODELO QUANTITATIVO DE AVALIAÇÃO DE RISCO – QRAM

Como foi já amplamente expresso nas considerações anteriores, o transporte de mercadorias perigosas por túneis rodoviários implica riscos especiais para os utilizadores, para a estrutura do túnel e para o ambiente. No caso de serem consideradas no sistema rotas alternativas àquelas que implicam a passagem nos túneis, adiciona-se a esta lista o risco associado às pessoas que vivem nas redondezas dessas mesmas rotas. Do ponto de vista da autoridade decisora, à partida aquela que gere a operação do túnel, há aplicar um modelo de tomada de decisão (DSM, *Decision Support Model*) que conduza à permissão ou restrição da passagem dos HGV's com mercadorias consideradas perigosas por esse túnel. A consideração de um termo intermédio leva ao estudo da introdução de medidas mitigadoras ou redutoras de risco, permitindo a passagem das mercadorias no túnel. Tal depende, entre outros factores, dos resultados das análises e da fase em que o projecto se encontra (ver capítulo 2). No caso de restrição, há que considerar uma rota alternativa para que esse transporte se efectue sendo que, no caso de permissão, dever-se-á decidir sobre a forma mais prática e segura de o fazer. Contudo, em ambos os casos, esse DSM baseia-se em informações de características semelhantes, os denominados

“indicadores de risco”. Estes indicadores são produzidos por Modelos de avaliação de risco sustentados em processos quantitativos e constituem informação precisa e objectiva, utilizável para diferentes tipos de mercadorias perigosas, túneis e cenários.

Não será demais enunciar novamente o verdadeiro paradigma da quantificação de risco neste campo de análise: as probabilidades de ocorrência de acidentes são muito baixas (ainda mais baixas são quando se trata de mercadorias perigosas) mas a verificação de um acidente tem graves consequências. São inúmeros os factores que podem ter influência nas probabilidades de ocorrência e nas consequências destes acidentes, quer se considere no interior ou no exterior de um túnel. Mesmo com o conhecimento de experientes na matéria que é essencial, a avaliação dos riscos para todas as circunstâncias, ambientes, condições climáticas etc. torna-se impraticável. Como tal, é indispensável fazer simplificações no processo e abordagem à análise e, com enfoque de primeiro plano neste capítulo, o recurso a ferramentas informáticas que permitam o cálculo computacional dos indicadores de risco.

Tal como pode ser constatado noutros momentos desta dissertação, nomeadamente no Quadro 2.1, a análise de risco por métodos quantitativos tem vindo a ser utilizada, não exclusivamente em túneis, ao longo dos anos em diversos países. Holanda (TunPRIM), Áustria (TURISMO), Suécia (QRA-Univ.Lund) e Noruega (TUSI) são alguns dos exemplos a destacar no que diz respeito ao pioneirismo no desenvolvimento destas ferramentas com aplicação direccionada a túneis no estrito âmbito do seu próprio território. As linhas genéricas destes modelos podem ser consultadas nos Anexos D, E e F. Por se limitarem aos próprios países, estes modelos, apesar de pioneiros, são de utilização restrita e pecam por não permitirem uma análise comparada em pormenor dos vários métodos de análise de risco.

Numa acção conjunta do PIARC e da OCDE em cooperação com diversos países e com coordenação do INERIS - *Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques* foi, então, desenvolvido um método harmonizado de avaliação de riscos associados ao transporte rodoviário de mercadorias perigosas, tanto em túnel como em trechos a céu aberto e suportado por um programa informático. Este método é grandemente reconhecido como DG-QRAM, sendo uma ferramenta única que pode ser usada em todos os países. Tem a particular vantagem de ser direccionado para a comparação, em termos de potencial de risco, de rotas em túnel com outras de secção aberta. O modelo foi desenvolvido com base em alguns tópicos estruturantes que servirão de orientação para a descrição do modelo. Segundo a estruturação idealizada para as PRA no capítulo 2.2, esses tópicos organizam-se em dois grandes grupos de desenvolvimento: o modelo de estimação de probabilidades e o modelo de estimação de consequências.

- Modelo de estimação de probabilidades - de base puramente estatística, com dados como as taxas de acidentes rodoviários, percentagens de HGV's nesses acidentes, percentagens desses acidentes que podem originar os cenários considerados e as probabilidades de ocorrência desses cenários aquando um acidente se dá.
 - Escolha de um número relativamente pequeno mas representativo de matérias perigosas e de cenários que as envolvam;
 - Avaliação das probabilidades de acidente associadas a cada cenário;
- Modelo de estimação de consequências – com as componentes física e fisiológica de avaliação de efeitos.

- Determinação das consequências físicas, estruturais e ambientais através das distâncias de influência de determinado efeito e considerando as características e equipamentos do túnel;
- Avaliação do grau de letalidade dessas consequências em túneis e a céu aberto, tendo em conta um determinado tempo de exposição;
- Possibilidades de evacuação e abrigo;

Fora destes grupos mas ainda considerados para o desenvolvimento do modelo do DG-QRAM estão as análises de sensibilidade e incerteza relativas a medidas redutoras de risco e, finalmente, uma validação do modelo. Também estes dois tópicos terão algum desenvolvimento posteriormente.

3.5.1. ESCOLHA DE MATÉRIAS PERIGOSAS E CENÁRIOS A ESTUDAR

As simplificações necessárias acima mencionadas passam, em grande medida, pela escolha representativa de matérias perigosas a ter em consideração na análise. De acordo com as classificações apresentadas em 3.3 e 3.4, em especial a primeira já que se destina directamente à categorização das matérias perigosas a nível internacional, a divisão destes produtos organiza-se em classes que reflectem as suas propriedades, efeitos e consequências potenciais, agrupando em conjunto aquelas que possam apresentar similitudes nessas características. Atendendo ao modo, que será ulteriormente aprofundado, como o DG-QRA avalia o risco, baseado na determinação computacional do número de mortos e fazendo-lhe corresponder uma determinada frequência anual e, atendendo ainda ao importante facto de o cálculo das fatalidades ser realizado pela sequência de processos de [avaliação física → avaliação fisiológica], isto é, o número de mortos (e/ou) feridos) é calculado em função da severidade dos efeitos do modelo físico (tendo em atenção as possibilidades de evacuação e salvamento), parece ter toda a lógica realizar a assimilação de mercadorias perigosas por grupos de efeitos. Com base nesta selecção de produtos, devem, para cada grupo idealizar-se cenários que as considerem, num processo simultâneo e, em toda a linha, correlacionável. É nesses cenários que deve estar, em último caso, explicitada a representatividade dos tipos de mercadorias perigosas e seus efeitos, assimilando-lhes não apenas os produtos directamente expressos mas também outros que possam gerar o mesmo tipo de fenómenos físicos e ter modos de influência similares nas pessoas. O princípio subjacente a este procedimento é o de manter a severidade (efeito) calculado para o cenário específico considerando porém que a frequência anual para gerar tais consequências não se deve apenas ao tráfego da matéria perigosa directamente associada mas entra também em linha de conta com outras que produzam os mesmos fenómenos. Na verdade, e como se verificará no seguimento deste e do próximo capítulos, o *input* tráfego e a forma como se regista a sua decomposição em HGV's e nesses qual a taxa daqueles que transportam DG's (*Dangerous Goods*), é de vital importância para o sucesso da avaliação a fazer. A identificação é possível pelo reconhecimento da rotulagem obrigatoriamente presente em cada um dos veículos que transportem DG, rotulagem essa feita nos moldes descritos em 3.3. No entanto, é importante notar que essa identificação é sempre de difícil execução e nunca poderá ser plenamente correcta. A esta aproximação adiciona-se ainda a referente à tomada de um número restrito de cenários como representativos de todo um conjunto de matérias muito amplo de milhares de diferentes produtos que podem ser transportados.

A selecção de cenários, que se passa seguidamente a apresentar, é, então, realizada com base neste pressuposto de representatividade aliado a outros mais simples e intuitivos, nomeadamente:

- Considerar cenários onde o risco (probabilidade x consequência) seja não negligenciável em túnel e/ou a céu aberto, isto é, desprezar cenários que não conduzam a fatalidades;

- Ter em consideração os principais efeitos da ocorrência de um acidente envolvendo DG's: sobrepressão, efeito térmico, toxicidade;
- Entrar em conta com o modo de acondicionamento dos produtos durante o transporte (em cilindros de pequena capacidade ou em grandes contentores).

3.5.1.1. HGV sem mercadorias perigosas

Este é um cenário que tem, logicamente, que ser considerado, já que se refere ao simples risco de se gerar um incêndio por razões que não estão relacionadas com o transporte de DG, mas sim de outro tipo de cargas. Assim, põe-se a questão de que tipos de fogos se podem desenvolver, de acordo com a inflamabilidade e capacidade térmica do carregamento transportado no veículo pesado e do próprio HGV. Naturalmente, a esta questão associa-se o cálculo de probabilidade de ocorrência. Tendo em conta essas probabilidades, pode esquematizar-se a seguinte árvore de falhas (Fig.3.2) representativa deste tipo de cenários e traduzida pela fórmula 13.

Atendendo à potência de aquecimento consideram-se, de modo aproximado, representativos os dois cenários seguidamente descritos (e subordinados à mesma árvore de falhas):

- HGV parcialmente descarregado (ou que contenha produtos inflamáveis) que possam gerar um incêndio de aproximadamente 20 MW – **cenário 1**;
- HGV carregado com materiais inflamáveis que possam gerar um incêndio de 100 MW – **cenário 2**.

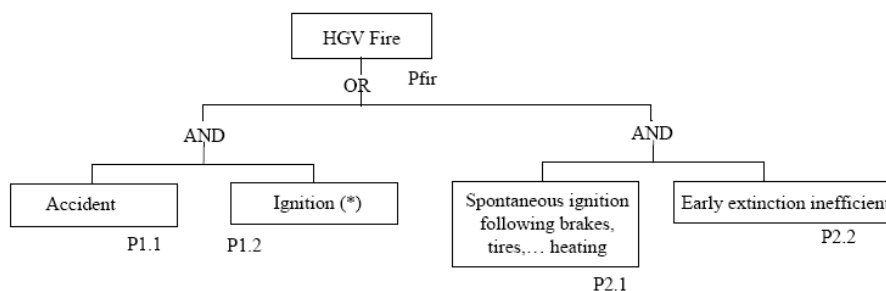


Fig.3.2 – Árvore de falhas para o cenário de HGV sem DG [18]

$$P_{inc} = P_1 + P_2 = (P_{1.1} \times P_{1.2}) + (P_{2.1} \times P_{2.2}) \quad (13)$$

3.5.1.2. GPL transportado em cilindros de pequena dimensão

O Gás de Petróleo Liquefeito é uma mistura de gases hidrocarbonados usado em aplicações de aquecimento e como combustível automóvel e substituindo cada vez mais os clorofluorcarbonetos com aerossol propulsor e refrigerante de forma a reduzir a agressividade para a camada de ozono. O GPL comercial inclui misturas que são principalmente propano e butano. A temperatura e pressão normais o GPL evapora-se. Como tal é fornecido em garrafas pressurizadas não completamente cheias para permitir a expansão do gás. Sendo mais pesado que o ar, em caso de fuga ficará perto do solo o que pode facilitar o perigo de ignição. De facto, em relação a este produto considerado perigoso transportado em cilindros de 50 kg, o cenário mais relevante que pode potenciar consequências importantes é o do desencadeamento de um BLEVE (ver capítulo 3.4.1) dado o transporte do GPL se realizar baixas temperaturas. A sequência de falhas que conduzem a este acidente – **cenário 3** – suporta-se na árvore esquematizada na figura 3.3 e na fórmula 14.

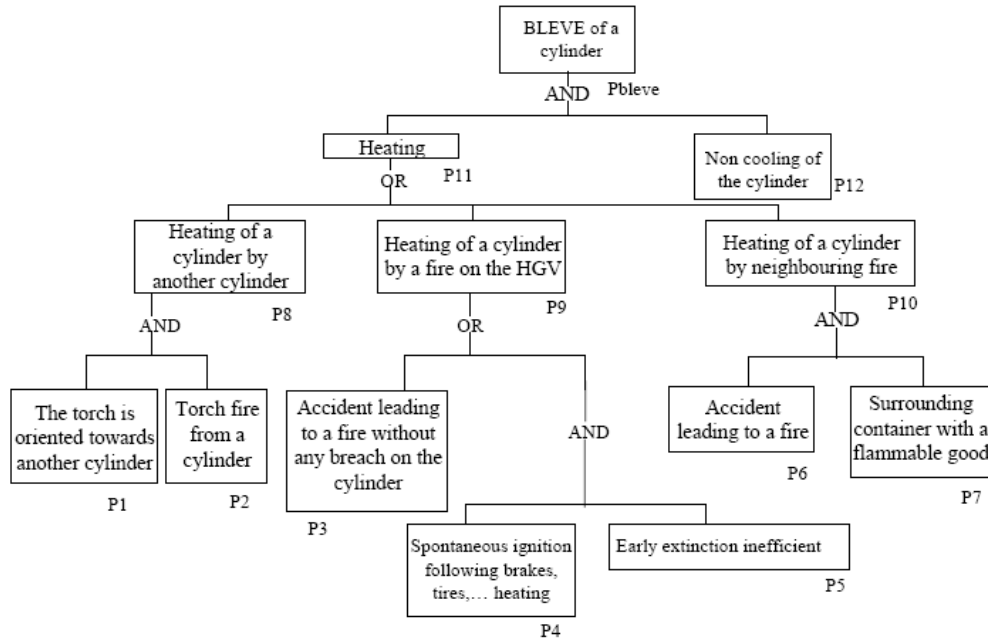


Fig.3.3 – Árvore de falhas para o cenário de BLEVE de cilindros de 50kg [18]

$$P_{BLEVE} = P_{11} \times P_{12}$$

$$P_{11} = P_8 + P_9 + P_{10}$$

$$P_8 = P_1 \times P_2 \quad P_9 = P_3 + P_4 \times P_5 \quad P_{10} = P_6 \times P_7 \quad (14)$$

Assim,
$$P_{11} = (P_1 \times P_2) + (P_3 + P_4 \times P_5) + (P_6 \times P_7)$$

$$P_{BLEVE} = P_{12} \times [(P_1 \times P_2) + (P_3 + P_4 \times P_5) + (P_6 \times P_7)]$$

Algumas reflexões devem, todavia, ser tecidas na análise deste cenário. No que toca ao ramo esquerdo da árvore correspondente a P_8 , considera-se que uma labareda proveniente de um cilindro já sujeito ao BLEVE não é capaz de gerar num outro cilindro. Isto deve-se essencialmente à compensação de pressões gerada pela labareda (abaixamento) e pelo aquecimento (aumento) e ao tempo de fogo que não será suficiente para induzir BLEVE. P_8 é então desprezável. Seguindo este mesmo raciocínio, põem-se as questões de quantos cilindros podem vir a gerar BLEVE e se esse fenómeno será em simultâneo ou sequencial, quando o aquecimento é proveniente de uma fonte mais potente (incêndio do HGV em P_9 e um incêndio nas imediações em P_{10}). A simultaneidade foi considerada, por especialistas na matéria, como extremamente improvável. Para discernir sobre estas dúvidas e procurar que o cenário 3 fosse o mais amplamente representativo possível, realizaram-se cálculos experimentais para perceber os efeitos físicos (fase a jusante na metodologia DG-QRAM – ver subcapítulos 3.5.2 e 3.5.3; no entanto aqui há a necessidade de entrar, ainda que genericamente, nessa fase para se discernir sobre a consideração do cenário) de um só BLEVE e de três BLEVEs em simultâneo, atendendo aos dois principais parâmetros condicionantes: a massa envolvida no fenómeno e a duração da bola de fogo, que tem influência directa no tempo de exposição das pessoas. Tais cálculos concluíram que a magnitude dos efeitos é a mesma nas duas modelações de consequências, pelo que se considera para a construção do cenário a hipótese de BLEVE num cilindro.

Refira-se que não foi considerado na lista de cenários escolhidos o equivalente ao cenário 3 mas sujeito a um VCE (*Vapour Cloud Explosion*) devido às suas consequências extremamente localizadas em céu aberto e à necessidade de que, para ocorrer tal situação, seria necessário estudar as probabilidades de abertura de uma fenda na garrafa cilíndrica acondicionadora, acontecimento que, por si, é muito improvável.

3.5.1.3. Grandes volumes de combustível líquido transportado em cisterna

Para este cenário é muito importante atender-se à probabilidade de incêndio. Pode começar pela idealização de uma ignição de uma porção de combustível derramado na estrada por meio de uma brecha aberta na cisterna (capacidade de 28ton) por um choque ou mesmo pelo enfraquecimento e consequente abertura de fendas na cisterna induzido por um fogo externo. Avançando novamente para jusante na metodologia - ver subcapítulos 3.5.2 e 3.5.3 -, assume-se um leque de possíveis diâmetros da poça gerada e diferentes relações de potências radiativas e convectivas do incêndio, pode dizer-se que a potência total de aquecimento de uma porção relativamente grande de combustível deve andar entre os 100 e os 1000MW.

Assim, para as secções em céu aberto considerou-se um **cenário 4** com uma potência intermédia deste intervalo de 400 MW para atender às atenuantes da expansão da poça (drenagem, inclinações transversais e longitudinais - estradas montanhosas, permeabilidade do solo consoante se está em zona urbana ou não etc.), não tendo sido, no entanto, considerado a hipótese de geração de fogo florestal.

No caso dos túneis o contexto é diferente, principalmente devido à limitação dos parâmetros que influenciam a extensão da poça, sendo neste caso usados esses parâmetros directamente para o cálculo da potência de aquecimento por meio de uma folha de cálculo.

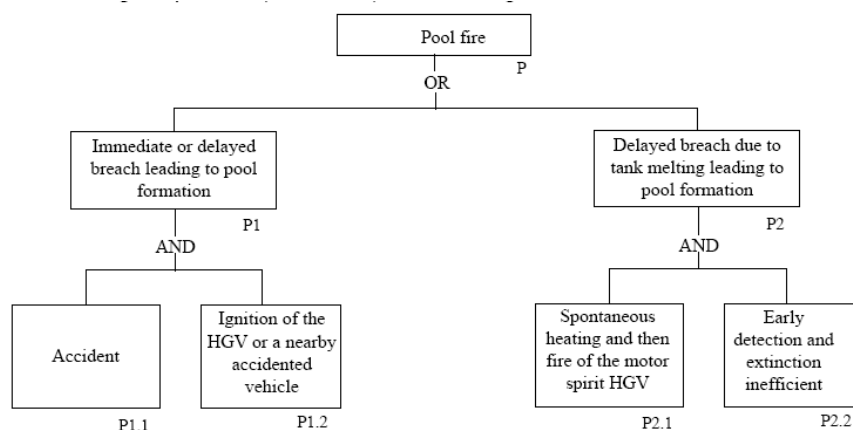


Fig.3.4 – Árvore de falhas para o cenário de ignição de uma poça de combustível [18]

$$P = P_1 + P_2 = (P_{1.1} \times P_{1.2}) + (P_{2.1} \times P_{2.2}) \quad (15)$$

Um **cenário 5** foi ainda adoptado para o caso de se abrir uma brecha e a poça criada não sofrer uma ignição inicial, criando-se uma nuvem de vapor e, consequentemente, uma atmosfera inflamável. Nestas condições, poderá dar-se um VCE logo que uma fonte de ignição suficiente entre nesta atmosfera. São preponderantes neste quinto cenário, para além dos condicionantes à expansão da poça já referidos, outros parâmetros como a volatilidade, índice de inflamabilidade, velocidade do ar e temperatura da estrada. A figura 3.5 e o conjunto de fórmulas documentam este cenário.

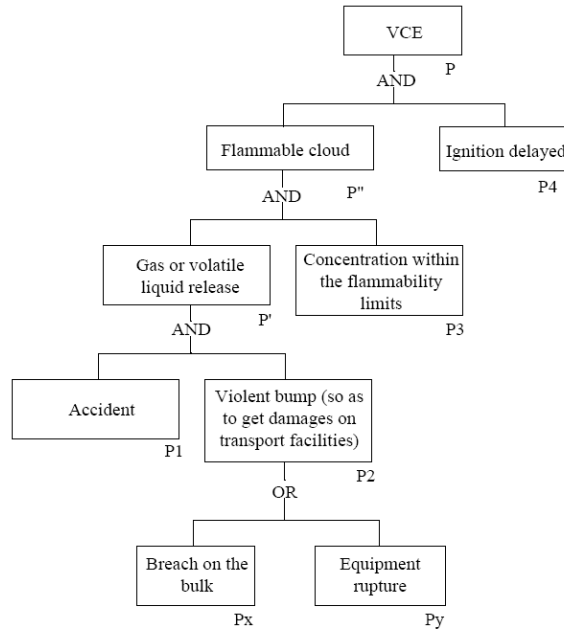


Fig.3.5 – Árvore de falhas para o cenário de VCE de uma atmosfera inflamável gerada por uma poça [18]

$$P = P'' \times P_4$$

$$P'' = P' \times P_3$$

$$P_2 = P_x \times P_y$$

$$P' = P_1 \times P_2$$

$$P' = P_1 \times (P_x + P_y)$$

(16)

Assim,

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \Leftrightarrow P = P_1 \times (P_x + P_y) \times P_3 \times P_4$$

3.5.1.4. Cloro transportado em cisterna

Neste caso consideram-se, à partida, duas hipóteses para este **cenário 6**, sendo uma relativa à libertação contínua no tempo por uma brecha de pequenas dimensões (50 mm) e outra, a de uma libertação instantânea de uma grande quantidade de produto. Ambos os cenários se representam pela árvore da figura 3.6 e pela fórmula 17. O risco principal associado ao transporte desta matéria perigosa é a produção de uma nuvem tóxica já que o cloro é um produto extremamente tóxico, venenoso e oxidante.

Observando a árvore, podem levantar-se questões sobre a comparação das ordens de grandeza da probabilidade e das consequências relativas à de libertação contínua e instantânea. Quanto à probabilidade, parece ser aceitável do ponto de vista do senso comum que uma fuga contínua possa ocorrer com maior frequência do que uma drástica fuga instantânea (embora ambas muito raras). Quanto às consequências, estudos de avaliação (jusante na metodologia, aprofundado no capítulo seguinte) revelaram que a sua magnitude é da mesma ordem de grandeza. Assim considerou-se para o cenário 6 o de fuga contínua por uma brecha de 50 mm de diâmetro como representativo para avaliação de consequências, sendo que a probabilidade condicional de ambos está, forçosamente, considerada na árvore de probabilidade de falhas,

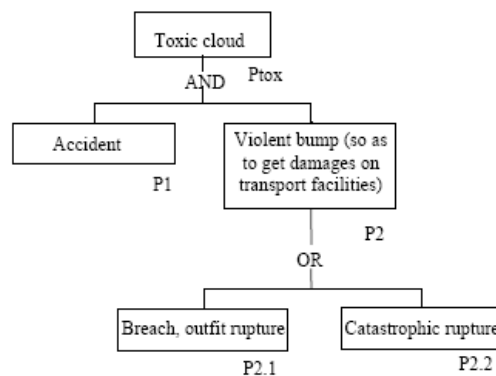


Fig.3.6 – Árvore de falhas para o cenário de transporte de cloro em cisternas [18]

$$P = P_1 \times P_2 = P_1 \times (P_{2.1} + P_{2.2}) \quad (17)$$

3.5.1.5. GPL transportado em cisterna

Atendendo ao transporte GPL em cisternas de grande capacidade (18 ton) há três cenários que têm que ser tomados em consideração dadas as suas grandes consequências.

A ocorrência de um BLEVE – **cenário 7** - é expressa por uma árvore de falhas em tudo semelhante à esquematizada na figura 3.3, ressalvando as devidas alterações de o transporte em cilindro ser realizado agora em cisternas. A sua probabilidade expressa-se agora por:

$$P_{BLEVE} = P_{12} \times [(P_1 \times P_2) + (P_3 + P_4 \times P_5) + (P_6 \times P_7)] \quad (18)$$

É essencial considerar também a ocorrência de um VCE – **cenário 8**. A sua árvore de falhas e a expressão das probabilidades são iguais às expressas na figura 3.5 para um VCE do combustível líquido.

Por último, há que levar em linha de conta um cenário direccionado para os efeitos da criação de uma chama em labaredas – **cenário 9** - a partir da cisterna. Esta ocorrência verificar-se-á com a mesma sequência de falhas vista para o VCE do combustível líquido, com a ressalva de em vez de uma ignição tardia, aqui a ignição ser quase imediata. A chama em labaredas no interior do túnel implica, todavia, que sejam feitas algumas notas quanto à análise de consequências: com a orientação da labareda para o eixo do túnel e na mesma direcção da ventilação o diâmetro da labareda não pode ser calculado da mesma forma que no exterior. De facto, esse diâmetro seria muito maior que o diâmetro do tubo do túnel, o que significa que a chama não se consegue desenvolver na totalidade, até porque no interior do túnel o oxigénio se torna rapidamente escasso para a alimentar. No caso de a orientação não ser a acima mencionada, a labareda é susceptível de se reflectir nas paredes do túnel e incidir de novo na cisterna. Atendendo a estas reflexões, admite-se, para efeitos da avaliação de consequências que posteriormente será mais escrupulosamente analisada, que um fogo em labaredas no interior de um túnel provoca consequências similares às de um BLEVE (cenário 7).

3.5.1.6. Amoníaco transportado em cisterna

Os riscos originados pelo transporte de produtos da classe dos tóxicos estão já representados no cenário 6. Porém, esse cenário pode não ser completamente representativo dado que o transporte de

cloro por meio rodoviário está, em muitos países, totalmente vedado ou com fortes restrições. Por conseguinte, é necessário idealizar um **cenário 10** que abarque os riscos de intoxicação nos países em que o cloro é proibido ou muito restringido em termos de tráfego. Estudos dizem que, quando o tráfego correspondente ao cenário 6 é da mesma ordem de grandeza do tráfego associado ao transporte de amoníaco e dos outros produtos tóxicos, pode considerar-se apenas uma curva representativa deste perigo referente ao cloro (esta curva e a correspondente ao cloro+amoníaco+outros produtos tóxicos são iguais; negligencia-se assim o cenário amoníaco). Quando as relações de tráfego são discrepantes, caso dos países que restringem legalmente o transporte de cloro por estrada, é inevitável a consideração de ambos os cenários, o cenário 6 e o este cenário 10 referente ao amoníaco. A árvore de falhas e a expressão probabilística são, logicamente, as mesmas.

3.5.1.7. Transporte de acroleína

A consideração desta matéria perigosa justifica-se pela necessidade de representar os efeitos originados por compostos químicos tóxicos mas com características líquidas, analisando assim a influência que os sistemas de drenagem dos túneis podem ter. A propriedade mais relevante neste caso prende-se com a volatilidade do líquido. Se esta for alta, como é o caso da acroleína, as consequências sobre as pessoas podem ser enormes estando, no entanto, sujeitas à demarcada influência que a eficiência do sistema de drenagem pode ter nestes casos. Dois cenários se consideram então: um referente a uma libertação contínua de acroleína por uma abertura de 100mm na cisterna onde se transporta – **cenário 11**; e um segundo cenário que consiste na libertação de acroleína transportada num cilindro (100l) – **cenário 12**.

3.5.1.8. Transporte de dióxido de carbono líquido e refrigerado

O **cenário 13** justifica-se pela necessidade de consideração dos importantes efeitos de pressão gerados pelos gases aquando da avaliação das consequências estruturais do túnel. Na verdade, as considerações anteriores englobando substâncias de classe 2 inflamáveis, capazes de gerar ambos os efeitos de pressão e de bola de fogo (calor), foram tomadas sob o ponto de vista da avaliação dos efeitos nas pessoas. Dessa perspectiva os efeitos térmicos claramente prevalecem. Assim se percebe a necessidade de introdução de um cenário que inclua um produto neutro do ponto de vista da oxidação, toxicidade e inflamabilidade e que, deste modo, aponte para a estimação dos efeitos de pressão na estrutura. Esse produto é o CO₂ pressurizado e refrigerado (que também pode provocar mortes pelo diminuição da concentração de oxigénio no ar).

3.5.1.9. Reflexões sobre leque de cenários considerado

Em resumo, o DG-QRAM toma na sua análise os riscos provocados por 13 cenários.

Quadro 3.3 – Resumo dos cenários considerados pelo DG-QRAM [18]

N.º	Descrição	Capacidade do recipiente	Tamanho da brecha (mm)	Fluxo de libertação (k/s)
1	Incêndio HGV 20MW	-	-	-
2	Incêndio HGV 100MW	-	-	-
3	BLEVE de GPL em cilindro	50 kg	-	-
4	Incêndio de poça de combustível	28 toneladas	100	20.6
5	VCE de combustível	28 toneladas	100	20.6
6	Libertação de cloro	20 toneladas	50	45
7	BLEVE de GPL em cisterna	18 toneladas	-	-
8	VCE de GPL em cisterna	18 toneladas	50	36
9	Chama em labareda GPL em cisterna	18 toneladas	50	36
10	Libertação de amoníaco	20 toneladas	50	36
11	Libertação de acroleína em cisterna	25 toneladas	100	24.8
12	Libertação de acroleína em cilindro	100 litros	4	0.02
13	BLEVE de CO ₂ liquefeito	20 toneladas	-	-

Como foi discutido nas notas introdutórias deste subcapítulo, estes cenários são uma pequena parte de uma imensidão de cenários possivelmente consideráveis, fazendo variar modos de transporte, aberturas de brechas, condições atmosféricas, condições de drenagem e de ventilação, as próprias matérias transportada e muitos outros parâmetros que de alguma forma possa ter influência no desenvolvimento de riscos não negligenciáveis para o transporte de DG. A lista final é, deste modo, uma simplificação baseada em alguns critérios lógicos e suportada em alguns estudos justificativos. No entanto não é e não pretende de modo algum ser uma lista absoluta, estática, perfeita. Alterações, adições, outras considerações podem ser feitas e o programa está preparado para tal. Pese embora as simplificações que encerra, os 13 cenários são a proposta mais recente feita pela equipa que desenvolveu o software para a melhor representatividade em termos de matérias perigosas e de risco para as pessoas, estruturas e ambiente associados ao seu transporte em túnel ou em céu aberto. Para facilitar a inteligibilidade das correspondências subjacentes aos cenários escolhidos e das demais matérias perigosas representadas para além das expressamente mencionadas nos cenários, a análise da tabela 3.4 é uma ferramenta de larga utilidade. A tabela está apresentada do ponto de vista da definição das taxas de tráfego relacionadas com cada cenário para introdução no modelo, tarefa na qual esta questão da representatividade está por demais evidenciada. Por meio desta tabela estabelece-se ainda uma interessante e importante correspondência entre os capítulos 3.3, onde foi apresentada a classificação tipificada de matérias perigosas considerada para esta dissertação, e o subcapítulo 3.5.1, onde estão descritos os cenários escolhidos para o modelo (note-se que há classes de mercadorias perigosas não representadas no modelo dada a dificuldade de as introduzir no modelo, o que constitui uma limitação que deve ser considerada).

Quadro 3.4 – Correspondência das DG dos cenários considerados com as classes tipificadas de DG que representam [adaptado de 19]

DG directamente associadas com o cenário	Correspondência com a tipificação de DG	Cenários
DG potencialmente causadora de um grande (100MW) incêndio (excepto líquidos)	DGs combustíveis (genericamente classe 4)	2
Propano 50 kg	Classe 2F (em cilindros)	3
Líquidos inflamáveis em cisterna	Classe 3	4
Fracção de líquidos inflamáveis potencialmente causadores de VCE (exclui gasóleo)	Classe 3 (com reservas)	5
Cloro em cisterna	Cloro (e outros gases muito tóxicos com IDLH <= 50 ppmv) em cisterna	6
Propano em cisterna	Classe 2F (em cisterna)	7, 8, 9
Amoníaco em cisterna	Classe 2T (TF, TC, TO, TFC, TOC) transportados em cisterna, excepto cloro e gases muito tóxicos	10
Acroleína em cisterna	Classe 6 (em cisterna)	11
Acroleína em cilindro	Classe 6 (em cilindros)	12
CO ₂ liquefeito em cisterna	Gases classe 2 não incluídos nas correspondências anteriores	13

Seguindo a mesma lógica de correspondência, é de inegável relevância evidenciar como nota final a relação entre estes mesmos cenários e a classificação direccionada aos túneis proposta pelo PIARC e apresentada no capítulo 3.4, realçando a importância que este sistema harmonizado de classificação tem, não apenas para o planeamento dos transportes internacionais de DG, mas também para as análises de risco a que devem legalmente estar sujeitos esses transportes. Tal paralelismo está expresso no quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Correspondência entre os cenários e a classificação de túneis PIARC [adaptado de 15]

Grupos de mercadorias	Cenários representativos
Grupo A	GPL em cisterna e em cilindros; dióxido de carbono em cisterna; amoníaco/cloro em cisterna; acroleína em cisterna e em cilindros; combustível em cisterna; HGV sem DG.
Grupo B	Dióxido de carbono em cisterna; amoníaco/cloro em cisterna; acroleína em cisterna e em cilindros; combustível em cisterna; GPL em cilindros; HGV sem DG.

Grupo C	Combustível em cisterna; GPL em cilindros; acroleína em cilindros; HGV sem DG.
Grupo D	GPL em cilindros; acroleína em cilindros; HGV sem DG.
Grupo E	HGV sem DG.

3.5.2. CÁLCULO DAS PROBABILIDADES DE FALHA

Seguindo a sequência lógica da metodologia do DG-QRAM expressa na introdução a 3.5, a fase que deve ser resolvida depois de feita a escolha dos cenários representativos é a do cálculo das suas probabilidades de ocorrência, isto é, avaliar com que frequência pode acontecer cada uma das falhas representada por cada ramo das árvores esquematizadas e, finalmente, a frequência de ocorrência do acidente em análise. Este capítulo não pretende calcular exaustivamente cada uma dessas probabilidades, mas sim introduzir o método que suporta esse cálculo, chamando a atenção para os pontos mais sensíveis do mesmo que têm que ser tidos em consideração.

Em primeiro plano, tome-se como essencial a percepção da dependência deste cálculo da variação de propriedades que verifica ao longo da estrada. Como tal, o utilizador tem que realizar uma divisão dessa estrada em secções lógicas e o mais homogêneas possível do ponto de vista do tráfego, características da estrada/túnel, DG transportadas, meio ambiente e condições atmosféricas, fornecendo e preparando esta série de dados por forma a serem introduzidos no modelo. Posto isto, o processo de cálculo dos cenários faz-se em quatro passos:

- i) Determinação das taxas de envolvimento em acidentes por parte dos HGV e dos DG-HGV expressas em MVkm (milhões de veículos quilómetro) para vários países, áreas urbanas e não urbanas, estradas bidireccionais ou separadas, céu aberto e túnel, condições de pavimento adversas e favoráveis. Esta tarefa pode ser abordada tanto pela determinação sucessiva das taxas de acidente e número médio de veículos implicados num acidente para cada situação ou pelo cálculo directos das taxas de envolvimento em acidentes se as bases de dados o permitirem;
- ii) Determinação do tráfego de HGV e DG-HGV para cada secção considerada, sendo o tráfego introduzido pelo utilizador traduzido para ser exprimido em termos de veículos quilómetro anuais ($TMD_{HGV/DG-HGV} \times 365 \times \text{extensão da secção}$);
- iii) Determinação da percentagem de HGV que podem conduzir aos cenários 1 e 2 (incêndios de 20 e 100 MW); o mesmo para os DG-HGV que podem conduzir aos restantes cenários;
- iv) Determinação final das taxas de ocorrência dos cenários.

Os passos 1, 3 e 4 são realizados pelo modelo. Os valores do passo 2 (tráfego) são um *input* para ser introduzido pelo utilizador e os do passo 3 podem ser igualmente introduzido mas o modelo fornece valores dados por defeito. O princípio para o cálculo das taxas de ocorrência pode expressar-se então pela fórmula compilada e explicada em seguida:

$$NHA_{ij} = SHA_{ij} \times AH_i \times TH_i \times L_i \times 365 \times 10^{-6} \quad (19)$$

- R é a rota considerada e R_i uma secção dessa rota;
- AH_i é o número de HGV implicados num acidente (em MVkm);
- TH_i é o tráfego de HGV em R_i ;
- L_i é a extensão de R_i ;

- SHA_{ij} é a taxa de ocorrência do cenário j uma vez acontecido um acidente (evento, ver adiante a explicação) envolvendo HGV na secção R_i ;
- NHA_{ij} é o número de cenários j por ano na secção R_i .

O mesmo se passa na para os cenários de DG, substituindo na expressão os valores referentes a HGV pelos referentes a DG-HGV. AD_i e TD_{ij} , os equivalentes a AH_i e a TH_i respectivamente, podem ser calculados a partir destes multiplicando pelo factor correctivo que relacione HGV e DG-HGV (k_D) no primeiro caso e pelos factores correctivos α_j , fracção de DG-HGV do tipo j no total de DG-HGV registados, e β_i , fracção de DG-HGV no total de tráfego de HGV na secção R_i . Concretizando vem:

$$AD_i = k_D \times AH_i \quad (20)$$

$$TD_{ij} = \alpha_j \times \beta_i \times TH_i \quad (21)$$

Para proceder com sucesso ao cálculo das taxas de cada cenário é indispensável ter à partida algumas definições bem clarificadas. O desenvolvimento do modelo DG-QRAM foi feito tendo por base a noção de **acidente** correspondente à seguinte definição: “acidentes são os eventos que envolvam colisões, capotamentos ou saídas de estrada por parte dos HGV’s. Se o evento não inclui nenhum destes acontecimentos é denominado um não-acidente, isto é, um incidente sem acidente”. A importância da clarificação deste conceito evidencia-se no facto de haver bases de dados em que a definição não é totalmente coincidente, o que pode gerar problemas de análise e tratamento desses dados.

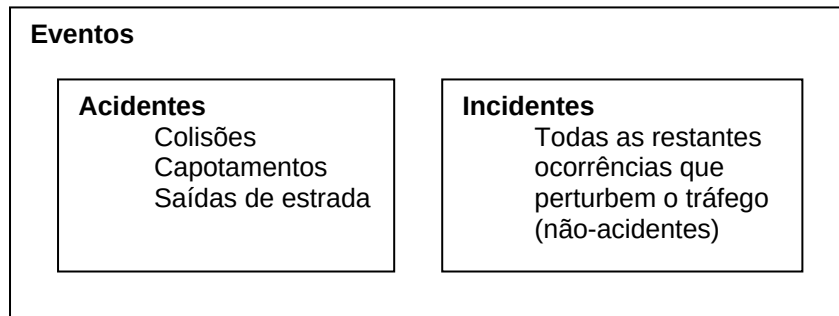


Fig.3.7 – Esquema explicativo das definições de Eventos, Acidente e Incidente adoptadas pelo modelo

Tendo em consideração que, muito frequentemente, as bases de dados não apresentam um grande grau de detalhe devido ao modo como os dados são recolhidos ser uma variável para cada base de dados, as questões no nível de detalhe e da definição conceptual tomam relevância particular. O esquema da figura 3.8 mostra uma situação indesejável em que a falta de clareza nesta análise pode degenerar: a definição de acidente leva a que sejam ignorados alguns eventos (não acidentes) que poderiam vir a resultar em cenários. A não contabilização da ocorrência de cenários tem consequências evidentes na fiabilidade das bases de dados a analisar.

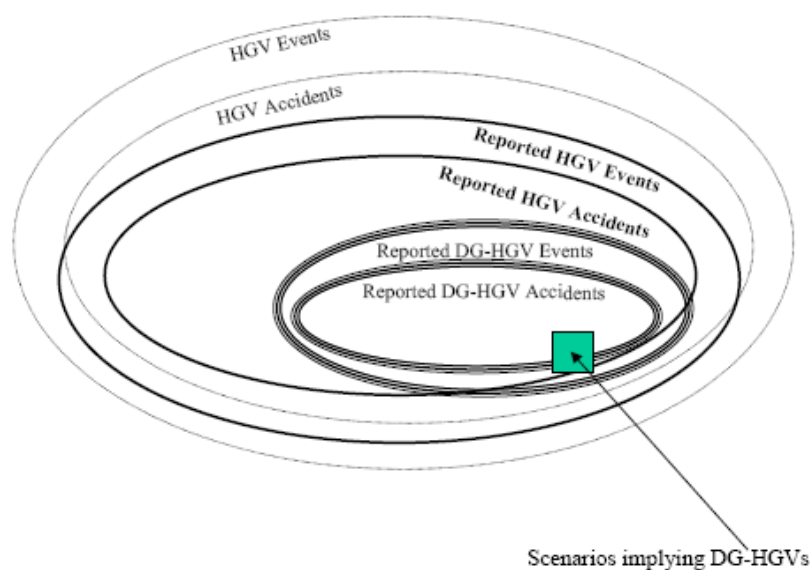


Fig.3.8 – Esquema da repartição dos diferentes tipos de eventos e acidentes [18]

Para evitar que esta situação crie estatísticas deturpadas da realidade, há que fazer pressupostos que resolvam o problema. A dicotomia está entre a consideração estatística dos dados referentes aos acidentes ou uma outra consideração estatística dos dados referentes à ocorrência de eventos que possam degenerar em cenários. Na prática, redefine-se o termo “evento” para todos os eventos que potencialmente criem um cenário. A análise estatística apoia-se assim na base de dados de ocorrência de cenários envolvendo DG-HGV, considerando que esta é uma parte dos eventos que os envolvem. Tal implica que, por força da falta de registos, não se aborde esta problemática de cálculo de probabilidade através da análise das árvores de falhas criadas para descrever as possibilidades de ocorrência de cada cenário considerado mas adoptando uma abordagem que se baseia no estudo dos registos históricos dos acontecimentos finais desses cenários (BLEVE, LPG, incêndio etc.), extrapolando daí as taxas de ocorrência dos mesmos no quadro global do tráfego da rota e deduzindo a probabilidade associada. Tais estatísticas são realizadas a nível nacional e o programa possui informações relativamente a esta matéria provenientes de alguns países (França, Noruega) e um registo genérico Europeu.

Aplicando estes princípios metodológicos, chegou-se aos valores de probabilidade de ocorrência de cada um dos 13 cenários em diferentes situações. No quadro 3.6 encontram-se expressos os valores *default* do modelo.

Quadro 3.6 – Taxas de ocorrência dos cenários que envolvem DG [adaptado de 18]

Cenários	Cenário	Tipo de DG	Quantidade	Túnel urbano	Túnel rural
	Características do cenário		Taxas de ocorrência do cenário		
BLEVE de propano em cilindro	3	2	Pequena	1.7×10^{-3}	5.1×10^{-3}
Incêndio de combustível em poça	4	3	Grande	2.8×10^{-3}	2.0×10^{-2}
VCE de combustível	5	3	Grande	2.8×10^{-4}	2.0×10^{-3}
Libertação de cloro	6	1	Grande	3.1×10^{-2}	5.4×10^{-2}

BLEVE de propano em cisterna	7	2	Grande	2.8×10^{-4}	2.0×10^{-3}
VCE de propano em cisterna	8	2	Grande	2.8×10^{-4}	2.0×10^{-3}
Chama em labareda de propano em cisterna	9	2	Grande	2.8×10^{-3}	2.0×10^{-2}
Libertação de amoníaco	10	1	Grande	3.1×10^{-2}	5.4×10^{-2}

3.5.3. PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS FÍSICAS E FISIOLÓGICAS

Calculadas que estão as probabilidades de ocorrência dos cenários pretende-se, com este subcapítulo de carácter transitório, atingir o objectivo final da metodologia, culminar de todo o processo de análise de risco sobre o qual se concentra o estudo. Contudo, a derivação não é imediata e tem subjacente um complexo processo de cálculo que, agora, se passará a abordar na óptica dos objectivos pretendidos. Convém não esquecer que a dissertação realizada se centra na análise de risco para os **utilizadores de túneis** do ponto de vista do transporte de **matérias perigosas**. Desta forma se justifica a introdução de certas simplificações na abordagem, simplificações essas que se prendem essencialmente com a não consideração dos riscos e seus efeitos em secções de estrada a céu aberto e com a adopção para indicador de risco apenas do número potencial de mortos que lhe está associado. Deve no entanto ser referido, que o modelo escolhido para substanciar a presente dissertação, o DG-QRAM, permite, como foi já perceptível em diversos momentos deste e doutros capítulos, análises mais alargadas que incluam riscos a céu aberto (o programa, como se referiu na sua introdução, é frequentemente utilizado para comparação de riscos entre rotas que incluam túneis e rotas alternativas que não possuam tais infra-estruturas), estando inclusivamente dotado de ferramentas que permitem analisar a transmissão de efeitos para o exterior do túnel de acidentes que se processem no interior, nas proximidades das suas secções de entrada e saída. É também devido ao facto da análise se focar no interior do túnel que a avaliação se faz incidindo exclusivamente sobre os utilizadores. O emprego de outros indicadores é possibilitado pelo programa, nomeadamente indicadores relacionados com o cálculo de feridos (juntamente com os mortos) e outros mais direccionados à avaliação de impactes estruturais e ambientais dos acidentes. Estes dois últimos serão levemente abordados.

Reafirmando o intuito transitório do presente capítulo, a sua fundamentação assenta na apresentação, ainda que sem entrar em aprofundamentos de ordem química e matemática que se afastariam do âmbito pressuposto para o trabalho, do processo que permite a efectiva determinação do indicador avaliador do risco a usar, o número de fatalidades que cada cenário tem o potencial de gerar. Tal processo só é aplicável quando se está em posse dos dados referentes às consequências físicas de cada cenário, tarefa que será detalhadamente vista no subcapítulo subsequente, recriando os cenários e simulando variações nos parâmetros neles importados. Porém, importa neste momento apresentar os modelos matemáticos e suas equações de cálculo para que se perceba quais são esses parâmetros e como se controlam.

Genericamente, pode afirmar-se desde já que o método de **avaliação das consequências letais** sobre humanos dos diferentes cenários, isto é, a transposição de efeitos físicos para efeitos fisiológicos, se faz por meio de funções Probit. Na estatística e na teoria das probabilidades, esta função é definida como sendo a função distribuição acumulada inversa (CDF) ou função quantil associada à distribuição normal. Os probits foram inicialmente usados para quantificar em termos de mortos os efeitos de certos produtos químicos, sendo hoje amplamente usados na área química e noutras. Uma abordagem

estatística deste tipo tem uma particular significância quando a resposta ao efeito sob análise pode ser racionalizado como distribuição lognormal, isto é, quando o logaritmo da variável aleatória em estudo tem uma distribuição normal. A introdução das funções probits no âmbito deste estudo justificam-se pela constatação de que as susceptibilidades a que estão sujeitas as pessoas quando expostas aos efeitos potencialmente letais das mercadorias perigosas consideradas são, justamente, do tipo lognormal. Não se justifica detalhar em profundidade as especificações matemáticas do modelo, no entanto deve realçar-se uma derivação da função básica já descrita: a função Ordered Probit. É um modelo que, avaliando também a severidade de um acidente em termos de mortos, o classifica em função de variáveis multinomiais intrinsecamente ordenadas, apresentando os resultados como uma sequência ordenada de valores discretos e não apenas uma classificação sim/não (morto/não morto). Uma variável multinomial que imediatamente pode ser interpretada segundo este modelo é a “gravidade dos feridos”, facilmente perceptível como discretizável em classes. Porém as variáveis “número de mortos” ou “probabilidade de morte” não são susceptíveis de uma análise deste tipo já que o seu uso é indissociável de uma abordagem absoluta do tipo verifica/não verifica. É exactamente este o princípio usado pelo modelo DG-QRAM para avaliar a letalidade relacionada com um acidente, indicador adoptado para este trabalho e utilizado nas considerações futuras, realizando uma análise com as devidas distinções para cada consequência vista na apresentação dos cenários.

Nas libertações de **gases tóxicos** (cloro, amoníaco e acroleína) o modelo estima a libertação de uma porção de produto (sua localização e variação da concentração no tempo) ao longo do túnel como função do local de acidente e das características do túnel. A aplicação do probit é feita através do conhecimento das características físicas da nuvem tóxica formada (cujo processo de formação será visto adiante), sendo as variáveis condicionantes o tempo de exposição e a concentração. O cálculo é efectuado para uma determinada gama de concentrações e tempos cujos probits possam ser transpostos para percentagens de letalidade (1%, 10% e 50% - a letalidade 100% não é considerada devido à falta de precisão dos probits de produtos tóxicos para este nível de valores tão extremos). Para os diferentes gases considerados, a formulação tem uma base idêntica embora os parâmetros variem consoante o gás.

Nos cenários com consequências que se traduzam em explosões de nuvens de vapor (**VCE**, *Vapour Cloud Explosions*) é usado um modelo simplificado que calcula o nível de sobrepressão gerado pela ignição de uma nuvem inflamável. Não é considerada a duração da onda de pressão neste modelo, o que simplifica consideravelmente a função probit associada, na qual não consta este parâmetro. Tal função aplica-se na avaliação de mazelas pulmonares mortais, efeito considerado como o mais significativo neste cenário.

Para o caso de um incêndio iniciado a partir do derrame de um produto inflamável e consequente formação de uma poça (**Pool Fires**), é possível calcular as distâncias a que se fazem sentir os efeitos deste cenário, uma vez estudados os movimentos dos fumos que provêm do incêndio. Esse cálculo faz-se a partir dos efeitos da radiação térmica da camada de fumos e da consideração da toxicidade desses mesmos fumos., sendo que são adoptadas duas formulações distintas para cada uma destas suposições (radiação térmica – Eisenberg Probit - e efeitos letais do monóxido de carbono presente nos fumos).

Nos cenários de chama em labaredas (**Torch Fires**) tidos em conta, concluiu-se com as reflexões apresentadas 3.5.1.5 que, no interior de túneis, se assume de forma simplificada que estes degeneram em BLEVE's. Como tal não se fará a consideração independente deste cenário, integrando-o na formulação destinada ao BLEVE, no parágrafo seguinte.

No que diz respeito aos **BLEVE's**, importa relembrar a sua divisão em duas subfases que se complementam: a expansão física uma vez rompido o recipiente de transporte da mercadoria perigosa, associado aos fenómenos de sobrepressão e efeito míssil; e a reacção química, dado que o produto transportado é inflamável. Com estes pressupostos, a análise de efeitos fisiológicos subdivide-se segundo a mesma lógica. Assim, a formulação de cálculo probit assume que o volume da bola de fogo formada por um BLEVE é da mesma ordem de grandeza no interior e no exterior de um túnel, avaliando os efeitos térmicos consequentes, após calculada a duração da bola, de forma idêntica ao já realizado para as *Pool Fires* (Eisenberg Probit). Já para os fenómenos relacionados com a pressão no interior do túnel, considera-se que resultam num pico de pressão de 8 bar ao longo do túnel, para um recipiente de 18ton. Para BLEVE's menores (cilindros de 50 kg) ou os denominados *Cold BLEVEs* usou-se nas formulações de determinação de consequências o método TNT equivalente (método de avaliação da energia libertada por uma explosão).

Um resumo das equações probit aqui descritas para os diferentes efeitos potencialmente mortais, apresenta-se no quadro 3.7. Nos casos em que a bibliografia sugere mais do que uma função para cada um desses efeitos, mostra-se aquele que é o mais conservativo.

Quadro 3.7 – Equações Probit empregues para avaliação do grau de letalidade [adaptado de 18]

Efeitos	Equações Probit
Incêndio/BLEVE – Térmico	$Pr = -14.9 + 2.56 \times \ln(q^{4/3}t)$
Incêndio – Fumos	$Pr = -37.98 + 3.7 \times \ln(C_{co}t)$
VCE	$Pr = -77.1 + 6.91 \times \ln(p^o)$
Tóxicos – Cloro	$Pr = -5 + 0.5 \times \ln(C^{2.75}t)$
Tóxicos – Amoníaco	$Pr = -35.95 + 1.85 \times \ln(C^2t)$
Tóxicos – Acroleína	$Pr = -3.18 + 1 \times \ln(Ct)$

Na nota introdutória desta secção foi dado a perceber que, para além do número de mortos, o DG-GRAM permite avaliar o impacto de um acidente num túnel sob outros pontos de vista, nomeadamente pelo número de feridos, o dano estrutural e o dano ambiental causado.

A **determinação de feridos** assume-se como um problema com contornos ligeiramente diferentes dos anteriormente vistos para os mortos. A principal divergência reside na diminuição da taxa de severidade de um determinado efeito com o aumento da distância ao epicentro gerador desse fenómeno, facto que sustenta o processo de cálculo das fatalidades e que, no caso dos feridos se prova não ser totalmente verosímil. Na verdade, a figura 3.9 documenta um exemplo da circunstância de decrescente probit percentual de fatalidades e crescente probit percentual de feridos com o aumento da distância ao epicentro de um acidente.

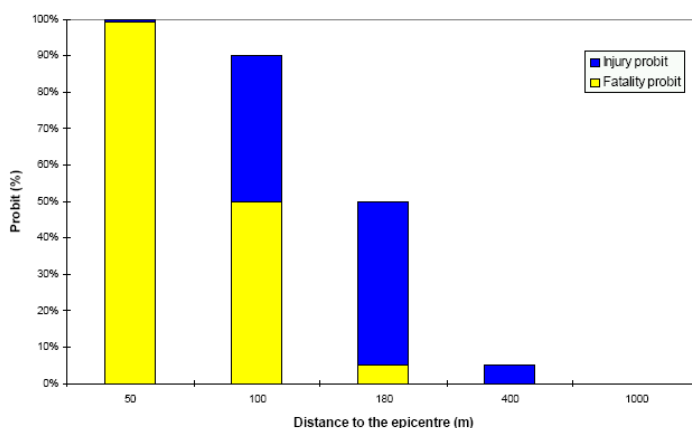


Fig.3.9 – Exemplo de evolução das percentagens de mortos e feridos com a distância [15]

Considerando esta importante conclusão que se traduz na dificuldade de produzir conclusões para feridos isoladamente, o programa tem a opção de cálculo de curvas F/N para mortos mais feridos conjuntamente (para além da opção base de cálculo de número de mortos apenas). A avaliação separada de feridos faz-se pela diferença entre as duas para o caso de incêndios, explosões e libertação de gases tóxicos.

Por outro lado, o modelo de análise de risco sob estudo disponibiliza um processo simples de análise de **danos estruturais** provocados por acidentes com materiais perigosos. Os cenários considerados críticos para esta avaliação foram os de incêndio, por efeitos da temperatura, e os de explosão, por efeitos de sobrepressão. Geralmente, as estruturas são baseadas num sistema de cargas apoiadas e a sua falha é susceptível de causar sérios problemas na integridade do túnel. Dois sistemas construtivos foram tidos como representativos: a construção por tuneladora - só o sistema de suporte é analisado - e o *cut and cover* - todo o sistema estrutural deve ser analisado (apoios, paredes laterais, tectos etc.). Foram, então, estudados os comportamentos estruturais e materiais dos componentes dos túneis para os dois sistemas construtivos, de acordo com a variação de temperatura e de pressão, estudo esse realizado em termos de perda da capacidade de resistência no caso de materiais estruturais (betão maciço, betão armado, estruturas metálicas) ou de perda da funcionalidade no caso de equipamento auxiliar (cablagem, caixas, iluminação). Em função deste estudo, o dano estrutural é categorizado conforme mostra o quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Categorias de dano estrutural consideradas pelo DG QRAM [18]

Damage Scenario	
1	Tunnel structure (collapse or structural integrity problems)
2	Internal civil structures including roadway (general integrity is not an issue)
3	Damage to protected equipment
4	Damage to unprotected equipment, eg. lighting

Complementarmente, a análise de dano estrutural materializa-se no cálculo (estimativa de alguma forma grosseira) dos custos de restabelecimento do normal funcionamento do túnel após reparação dos danos. Esta é uma matéria altamente subjectiva já que depende da tipo de túnel, do seu tamanho, localização, nível de dano entre outros. Mais ainda há que ter em conta as diferenças de custos de materiais e laborais/construtivos de país para país. Como tal, para evitar estas incertezas, o cálculo de

custos realizado pelo modelo é apresentado como uma percentagem do total de capital estimado que seria necessário investir para construção de um túnel novo idêntico ao que está sob estudo. Tal é materializado pela afectação de percentagens do custo total a cada uma das componentes do túnel, diferenciando os valores em função dos processos construtivos e tipo de túnel. A estimativa de custo total é, então, obtida pela soma das percentagens de custo de cada componente do túnel afectada com determinado acidente, sendo que cada uma dessas percentagens deve ser afectada de um factor que pondere a extensão do túnel e a respectiva área afectada.

Por último, é relevante referenciar a possibilidade de o modelo DG QRAM realizar ainda uma avaliação com base nos **impactes ambientais** dos acidentes com matérias perigosas. Tal análise é feita em relação à contaminação da atmosfera, água e solo - tal como se mostra no esquema da figura 3.10 – e tem por base indicadores demarcadamente qualitativos, o que limita propositadamente a abrangência da análise já que no âmbito deste modelo se pretende apenas uma abordagem indicativa e superficial dos impactes ambientais. Os riscos ambientais foram classificados qualitativamente em negligenciáveis, baixos, médios ou altos.

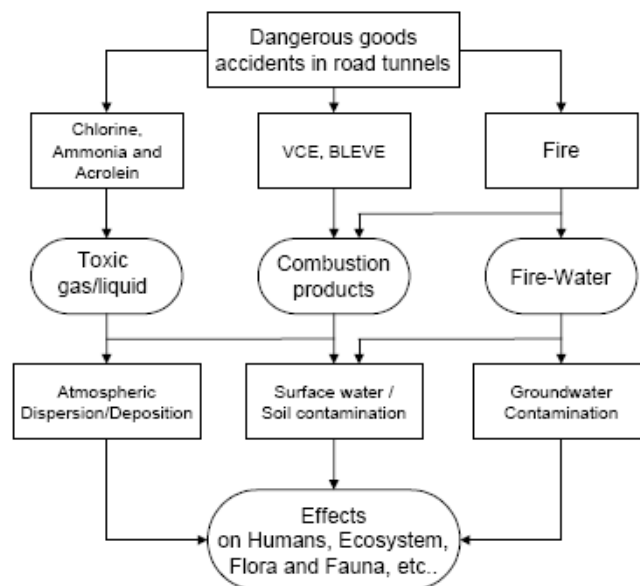


Fig.3.10 – Componentes da poluição ambiental consideradas para a análise no modelo [18]

3.5.4. MODELAÇÃO DE CENÁRIOS E AVALIAÇÃO DE CONSEQUÊNCIAS EM TÚNEIS

Este subcapítulo tem a finalidade de descrever com pormenor o processo de modelação previsto no DG QRAM para consubstanciar a transposição de consequências físicas de um determinado acidente para as correspondentes consequências fisiológicas traduzidas, na grande maioria das vezes e da forma mais representativa, por número de mortos. Pelo carácter transitório supramencionado da secção antecedente, se percebeu que é a aplicação das funções probit descritas que materializa tal transposição. Contudo, a aplicação dessas funções pressupõe um conhecimento prévio das condições de evolução e desenvolvimento de cada cenário, implicando pois uma recriação dos mesmos que permita perceber e controlar com exactidão quais as consequências que cada um dos cenários pode produzir. Assim, esta secção debruça-se sobre a descrição dos princípios e técnicas principais adoptadas para a modelação das possíveis consequências de acidentes com matérias perigosas em

túneis rodoviários sendo que está em íntima relação com a secção anterior e constitui conhecimento essencial para a aplicação aí apresentada.

A realização desta tarefa em túneis encerra algumas singularidades que a tornam particularmente complexa. De facto, nas secções a céu aberto a reconstituição dos cenários para análise tem uma dependência muito alargada de praticamente um factor em exclusivo: as condições climáticas. Nos túneis o panorama é deveras distinto. Apesar de assentar num princípio base comum, o do cálculo de distâncias nas quais se faz sentir a propagação de efeitos, as condicionantes que afectam essa propagação são muito diversas e nem sempre pacíficas de serem sujeitas a uma modelação simplificada. Na prática, para transcrever a realidade com total precisão seria necessário modelar propriedades que variam enormemente de túnel para túnel tais como as suas extensões, inclinações transversais e longitudinais, sistemas de ventilação, sistemas de drenagem, sistemas de controlo de tráfego entre outros. O desenvolvimento de uma metodologia simples e inteligível para toda a gama de variabilidade destas propriedades seria impossível. Como tal, um reduzido número de parâmetros foi escolhido para modelar as consequências e algumas simplificações foram feitas. A secção transversal considera-se rectangular em toda a extensão e é adoptado o conceito de secções do túnel que não são mais do que partes cujas características em termos de dimensões, inclinações e ventilação se assemelham ao ponto de serem susceptíveis de serem agregadas e consideradas em conjunto. O comprimento destas secções é, então, determinado segundo o princípio da idealização de representatividade máxima, tendo em conta que essas propriedades têm grande influência no movimento dos fumos ou gases, a ventilação na dispersão dos fumos e a drenagem no tamanho das poças de combustível geradas. Estas influências serão, seguidamente, aprofundadas e relacionadas com a recriação de cenários e modelação das suas consequências. Para já, concentram-se atenções nos principais perigos que cada cenário pode produzir e a forma como os seus efeitos se propagam e se fazem sentir no interior do túnel, percebendo assim em que medida esses efeitos são letais. A observação do quadro 3.9 constitui um bom ponto de partida.

Quadro 3.9 – 13 cenários de acidente considerados e seus mais proeminentes efeitos [18]

	Cenário de acidente	Principal perigo(s)
1	Incêndio de HGV, 20 MW (vazio ou com pouca carga combustível)	Incêndio e fumo
2	Incêndio de HGV, 100 MW (carregado com carga combustível)	Incêndio e fumo
3	BLEVE GPL, cilindros de 50 kg	Bola de fogo e efeitos de pressão
4	Incêndio de combustível em poça, cisterna de 28 toneladas	Incêndio e fumo
5	VCE de combustível, cisterna de 28 toneladas	Efeitos térmicos e de pressão
6	Libertação de cloro, cisterna de 20 toneladas	Gases tóxicos
7	BLEVE GPL, cisterna de 18 toneladas	Bola de fogo e efeitos de pressão

8	VCE de GPL, cisterna de 18 toneladas	Efeitos térmicos e de pressão
9	Chama em labareda GPL, cisterna de 18 toneladas	Bola de fogo e efeitos de pressão
10	Libertação de amoníaco, cisterna de 20 toneladas	Gases tóxicos
11	Libertação de acroleína, cisterna de 25 toneladas	Líquidos tóxicos
12	Libertação de acroleína, cilindro de 100 litros	Líquidos tóxicos
13	BLEVE de CO ₂ liquefeito, cisterna de 20 toneladas	Efeitos de pressão

A análise deste quadro permite organizar de forma compreensiva o trabalho subsequente, organização baseada nos principais perigos de consequências físicas aí relatados para cada um dos 13 cenários considerados no DG QRAM. O recurso às propriedades físicas dos produtos envolvidos registadas na tabela do Anexo G é útil para acompanhar alguns processos de cálculo.

3.5.4.1. Incêndio e Fumo

Nesta secção estão englobados os cenários de incêndio de HGV (cenários 1 e 2) e de combustível líquido derramado em poça na via (cenário 4).

No caso dos cenários 1 e 2, a análise das características do incêndio e suas consequências físicas é feita com base numa área de chama de 10m de comprimento por 2.5m de largura a arder durante 1h, o que corresponde a uma potência por unidade de área (horizontal) ocupada pelo fogo de 0.8 MW/m² e de 4MW/m² respectivamente. Foi definido um rácio para a potência radiativa de 25% da potência total por unidade de área (horizontal) da chama, sendo que a modelação física da radiação se suportou numa ferramenta desenvolvida paralelamente ao programa principal denominada FNAP¹, que automatiza o cálculo das consequências físicas e de dispersão de efeitos ao longo da extensão do túnel, recorrendo a valores plausíveis de altura da chama e segmentando zonas com determinadas distância de equivalente calor sentido pelas pessoas. Empregando o supra referido Probit Eisenberg far-se-á a tradução destas distâncias para consequências fisiológicas, mais precisamente, para a letalidade (probabilidade de morte) que se verificará, assumindo-se que nestes cenários o aparecimento de mortalidade corresponde a uma exposição permanente ao fogo (tem-se por exposição permanente aquela que dure por um tempo superior a 1 minuto) com uma intensidade por unidade de área (vertical) ocupada pela chama de 5kW/m². O objectivo é a definição da relação de variação da potência radiativa calorífica com a distância ao incêndio por meio do FNAP, mais precisamente de um parâmetro denominado factor de incidência (*view factor*) aí considerado. É exactamente nesse factor que reside a dependência da distância entre a fonte emissora de radiação e a receptora, para além de ter em conta o posicionamento do receptor face à chama e eventuais obstáculos entre eles. Obtém-se, então, o fluxo de radiação incidente (I, expresso em kW/m²), função da potência radiativa emitida, da distância ao ponto emissor, a chama, dada pelo *view factor* e ainda por uma constante de transmissibilidade atmosférica. O valor da carga de radiação térmica a entrar na função probit será a multiplicação de I elevado a 4/3 pelo tempo t, em segundos, de exposição. A sequência de cálculo e as

¹ Ferramenta informática desenvolvida pelo INERIS para cálculo dos efeitos térmicos gerados por um incêndio; vem do termo francês “*feu de nappe*” que significa fogo de uma poça.

respectivas fórmulas estão esquematizadas na figura 3.13, cuja visualização se aconselha para um melhor entendimento.

No cenário 4, a relação da potência calorífica radiada estabelece-se segundo procedimento análogo. No entanto há um acréscimo de complexidade na determinação das características físicas do incêndio (potência calorífica; as dimensões admitem-se serem limitadas pelas da secção transversal do túnel) por estas dependerem das características da própria poça que, por sua vez, dependem de factores altamente variáveis como sejam o diâmetro da brecha por onde o líquido se escapa, da pressão e, com particular incidência nos túneis, o sistema de drenagem e inclinações da estrada que lhe estão associadas. O procedimento, descrito detalhadamente em [18], envolve o cálculo da área da poça e suas dimensões, a forma como ela se espalha na estrada e respectiva orientação desse espalhamento com influência do sistema de drenagem (ver figura 3.11). Diversos estudos neste âmbito citados na bibliografia permitiram estandardizar o processo de análise do espalhamento. Determinada a área da poça com base nestes parâmetros físicos, relações simples permitem obter a potência calorífica total (a radiada será 25% desta) e a duração do incêndio.

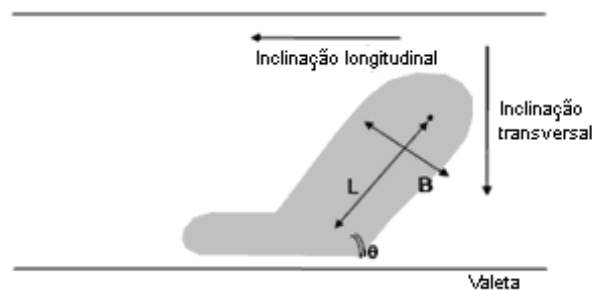


Fig.3.11 – Esquema das relações presentes no processo de análise de espalhamento da poça [18]

É importante referir ainda a simplificação incorporada pelo modelo relativa à consideração de uma libertação de calor constante ao longo do tempo. Na verdade, há uma taxa de libertação de calor variável no tempo, crescente nos primeiros 10 minutos, aproximadamente, e atingindo aí um máximo. Estudos revelam que durante os primeiros 3 minutos os incêndios são de fraca intensidade e improváveis de causar mortes. Assim, a modelação é feita admitindo que é nula a dose de calor radiado recebido pelas pessoas nos primeiros 3 minutos seguintes à ignição. Após esses 3 minutos a radiação térmica é calculada com base nos efeitos do incêndio plenamente desenvolvido. A figura 3.12 documenta esta simplificação.

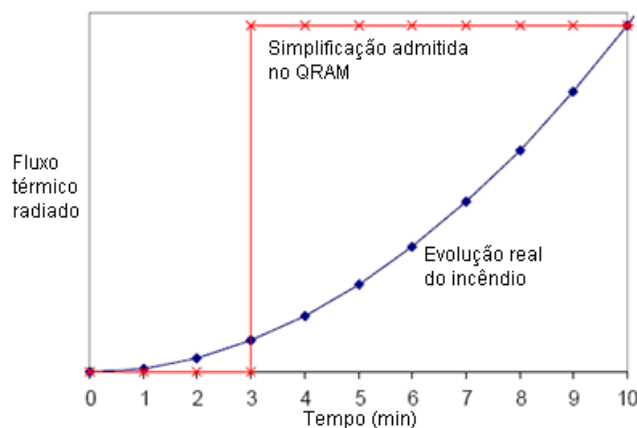


Fig.3.12 – Ilustração da simplificação relativa ao incêndio instantâneo [18]

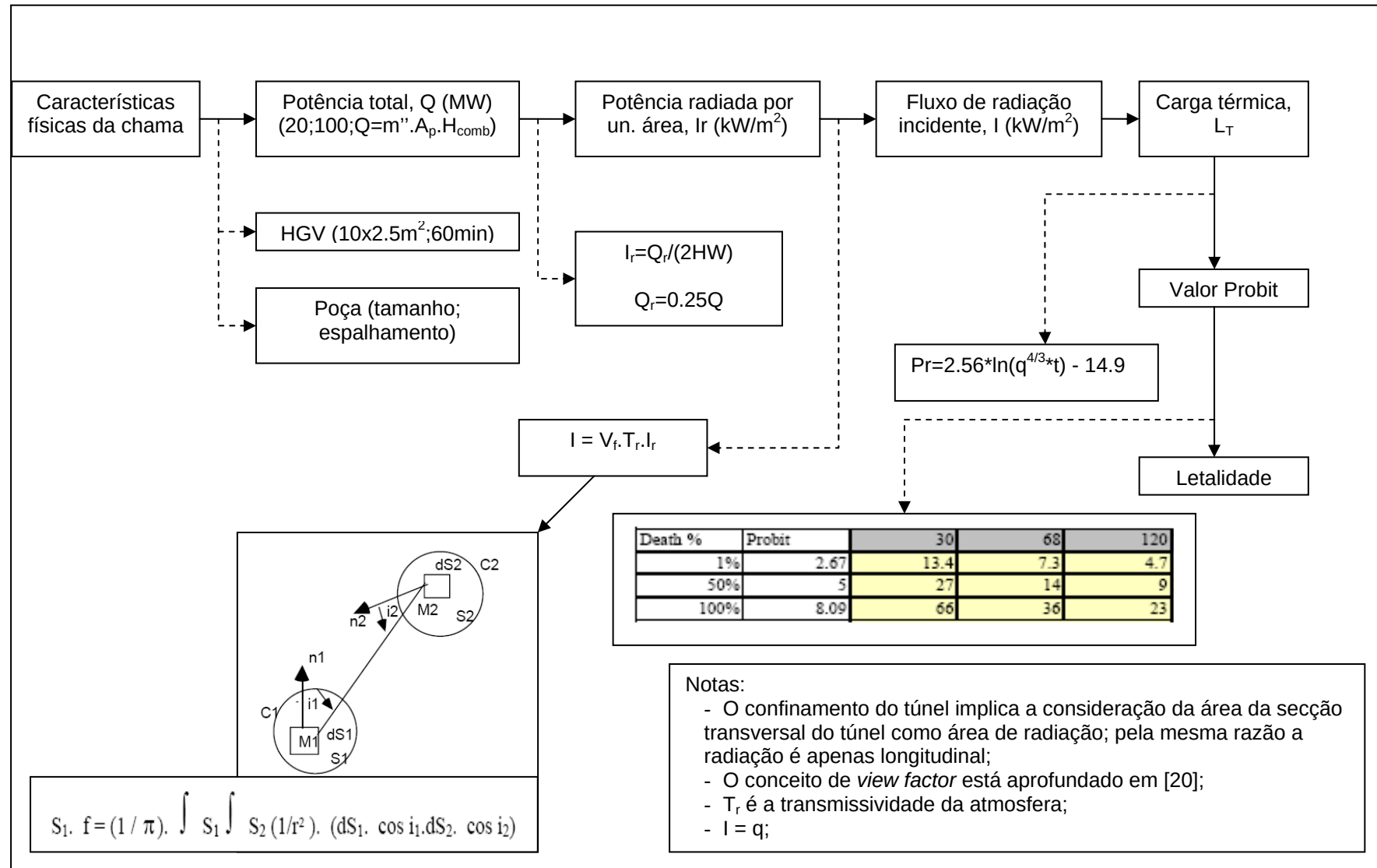


Fig.3.13 – Esquema do procedimento seguido para a definição da relação Calor x Distância, segundo o FNAP

A produção de fumos e o seu percurso no interior do túnel constituem, para os três cenários em causa, um grande perigo cujo estudo é impreterível. Como tal, o DG QRAM engloba neste processo de modelação de consequências um método de análise destinado a controlar e entender as particularidades relacionadas com o tratamento dos fumos. Tal método, descrito na totalidade em [18], quantifica a produção de fumos e o aumento de temperatura provocado por esses fumos. No que respeita ao movimento, propriedade de difícil análise devido aos efeitos de estratificação, é adoptada uma abordagem fundamentada no cálculo da velocidade da camada de fumos e da profundidade da mesma e a sua dependência da geometria do túnel e magnitude e direcção do caudal de ventilação (no caso de ventilação natural esta dependência não existe). Introduce-se, então, o conceito de “regime de fumos” (*smoke regime*), que não é mais do que a admissão de três possíveis cenários de desenvolvimento do fumo produzido: túnel totalmente livre de fumos; túnel com camadas estratificadas em ambas as direcções; túnel com mistura total de fumos na direcção da ventilação e em toda a altura. Atente-se na figura 3.14 para melhor entendimento destes regimes, notando que a formação de um ou outro regime depende da relação entre a velocidade da camada ventilada artificialmente e uma velocidade crítica dada por Kennedy¹⁹⁹⁶.

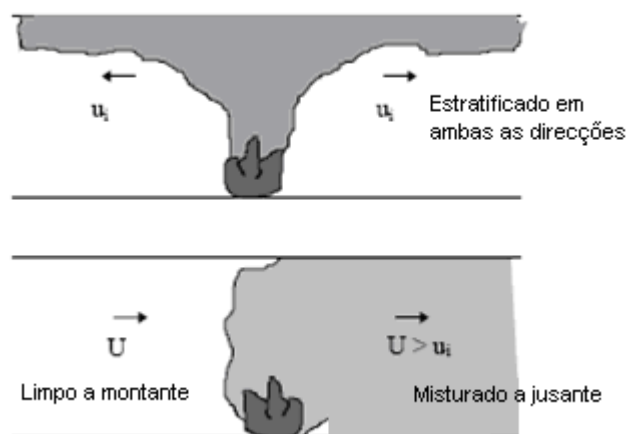


Fig.3.14 – Regimes de espalhamento dos fumos [18]

Facilmente se depreende a grande influência que os sistemas de ventilação têm no processo que acaba de ser resumidamente descrito. A maior importância do sistema reside na redução do fenómeno de *backlayering* a montante e na aceleração da camada para jusante. Torna-se possível, por intermédio de formulações citadas nas fontes – Heselden, 1976 [18] -, calcular a velocidade da frente de fumo e a profundidade da camada, usando esses valores para avaliar a duração de chegada do fumo a um determinado local do túnel e outras. Avaliam-se ainda neste âmbito os efeitos tóxicos dos fumos, os efeitos na visibilidade e de radiação térmica emitida pelos próprios fumos. Para efeitos tóxicos, calcula-se concentração de monóxido de carbono e, com isso, uma carga tóxica dependente do tempo de exposição, a qual se vai aplicar no probit adequado. Para radiação térmica, para além da radiação proveniente do fogo calculada pelo fluxo de radiação incidente com base na potência calorífica por unidade de área (vertical) de chama, há que somar a radiação proveniente da camada de fumo quente, calculando assim a carga de radiação térmica a usar na aplicação do probit Eisenberg.

3.5.4.2. Nuvens de vapor tóxico

Agrupam-se, no âmbito da análise de toxicidade, os cenários envolventes o transporte de produtos tóxicos líquidos ou gases, representados pelo cloro, amoníaco e acroleína e que correspondem na numeração atribuída pelo DG QRAM aos cenários 6, 10, 11 e 12.

Uma vez mais a avaliação de efeitos físicos, isto é, a modelação dos cenários de desenvolvimentos das nuvens tóxicas, difere consideravelmente em termos de método quando se compara o do interior de um túnel com o de secção aberta. Neste caso, o facto de a propagação estar sujeita às condições climatéricas condiciona todo o método que, praticamente, vê nesse parâmetro a sua única dependência. Assim, foi desenvolvido em paralelo o software PHAST 4.2² que determina a forma como se disseminam os efeitos tóxicos de uma libertação dentro das condições definidas para os cenários referidos (e tidas como representativas) ao longo de uma distância na direcção do vento ao epicentro do acidente, para diversas condições meteorológicas fixadas pelo factor de estabilidade de Pasquill [21] e pela velocidade do vento. O cálculo assenta na aplicação dos valores de concentração e tempo de exposição a uma função Probit apropriada (ver 3.5.3), obtendo-se “pegadas” de efeitos traduzíveis para letalidade.

Enquanto em secções a céu aberto o cálculo está automatizado por um software auxiliar, em túnel a modelação física segue uma metodologia de cálculo específica e mais complexa. É importante relembrar as condições idealizadas para estes cenários:

- Cenário 6, cloro em cisterna de 20ton com fuga por uma brecha de 50mm de diâmetro, o que corresponde a um caudal de fuga de 45kg/s durante 7.5min;
- Cenário 10, amoníaco em cisterna de 20ton com fuga por uma brecha de 50mm de diâmetro, o que corresponde a um caudal de fuga de 36kg/s durante 9.3min;
- Cenário 11, acroleína líquida em cisterna de 25ton com fuga por uma brecha de 100mm, o que corresponde a um caudal de fuga de 25kg/s com uma poça de um máximo de 300m²;
- Cenário 12, acroleína líquida em cilindro de 100l com fuga por uma brecha de 4mm, o que corresponde a um caudal de fuga de 0,02kg/s;

Estes pressupostos reflectem que na definição dos cenários foram já especificados valores de rácios e caudais de fuga dos produtos tóxicos. No entanto, o método agora exposto permite que esses valores sejam recalculados para casos não standard. A sua libertação em pressão leva a que, imediatamente após libertado, uma porção do produto se evapore na atmosfera ou forme uma poça evaporadora. Nesta metodologia, o objectivo é o de simplificar a caracterização numérica da fonte de vapor, o que é conseguido numa primeira fase com a quantificação, em fracção de massa, dessa porção de vapor que evapora instantaneamente. Num segundo passo, recorrendo a uma equação de balanço entálpico (entalpia é a grandeza física que descreve a energia interna total de um sistema), calcula-se a quantidade de ar necessária para evaporar a restante parte de produto tóxico. Fazendo uso das características físicas registadas no Anexo G e tendo a área de secção do túnel, está-se em condições de calcular ambos os parâmetros e deduzir a velocidade necessária de ar para o processo de evaporação completo se dar. Por comparação com a velocidade de ventilação, se infere da capacidade dessa mesma ventilação, por si só, de ser auto-suficiente na disponibilização da quantidade de ar necessária. Se sim, calcula-se directamente o fluxo e a densidade da mistura. Se não, refazem-se os

² PHAST - Process Hazard Analysis Software Tool, versão 4.2. Lançado pela empresa DNV Technica Ltd, Londres e sujeito a estudos da INERIS para integração no DG QRAM.

cálculos com a admissão de que o produto evaporado pelo fluxo de ar no túnel é, no mínimo, igual ao evaporado instantaneamente no fenómeno inicial aquando da libertação.

A esta sequência de cálculo, segue-se a avaliação dos dados obtidos em termos de consequências ao longo do túnel, isto é, em que condições se irá dispersar a nuvem tóxica no espaço confinado que é, por princípio, um túnel. O mesmo é dizer que se torna necessário calcular a velocidade de dispersão da nuvem, a sua profundidade e a sua concentração ao longo da extensão. Tal permite a avaliação da carga tóxica (função do tempo de exposição) e sua aplicação em funções probit para determinação da fatalidade.

As formulações que acompanham esta descrição encontram-se em [18]. No entanto, no presente trabalho, pretende-se apenas uma ideia genérica do procedimento metodológico intrínseco.

3.5.4.3. BLEVE de GPL

Enquadram-se nesta análise os cenários de transporte de Gás de Petróleo Liquefeito (GPL, aqui tomado como sendo Propano) em cilindros de 50kg e cisternas de 18ton, cenários 3 e 7 respectivamente. Integra-se ainda o cenário que envolve a chama em labaredas numa cisterna de GPL, cenário 9, que, como referido anteriormente, se admite degenerar num cenário 7 no interior de túneis. Pela tabela 3.9, tomam-se como principais consequências físicas para a análise os efeitos de bola de fogo de um BLEVE (ver 3.4.1, explicação do fenómeno BLEVE) - e suas consequências térmicas, não referidas nesse quadro mas inerentes – e efeitos de pressão, o que sucede para as situações de secção aberta e túnel.

Em secção aberta, foi novamente desenvolvida uma ferramenta extra denominada T.R.C. Model³ que tem por objectivo definir com exactidão a variação no tempo das características da bola de fogo (raio, elevação, potência radiativa calorífica). Este modelo admite que o desenvolvimento da bola de fogo se divide em três fases e submete a sua caracterização a essas fases/estádios de evolução. Contudo, a análise em túnel abarca outro tipo de complexidades e o conhecimento científico neste campo é ainda limitado. Assim, toma-se a análise das características físicas da bola de fogo como as médias dadas pelo TRC Model (diâmetro e duração não variáveis no tempo). Com estes valores, de forma simples se chega ao volume (assumido esférico, tal como em *open*) da bola e, tendo as dimensões da secção transversal do túnel e assumindo que a bola vai ocupar toda essa área, deduzir a extensão de túnel ocupada pela bola. Seguindo esta lógica de cálculo, podem levantar-se questões sobre a quantidade disponível de oxigénio no túnel para suportar este fenómeno e ainda sobre a transmissão considerável de efeitos ao exterior pelas extremidades do túnel, sobretudo para o cenário de BLEVE da cisterna de 18ton (realizando os cálculos conclui-se que, neste caso, a bola propagar-se-á por uma extensão equivalente de túnel de 38Km).

Porém, a análise em túnel, não permite a aplicação do modelo TRC para a interpretação dos efeitos térmicos. Tal é executado segundo um processo em tudo idêntico ao já exposto na secção 3.5.4.1 aquando da análise de efeitos térmicos para incêndios em HGV's e de combustível líquido, admitindo para emissão de potência por unidade de superfície o valor de 270 kW/m².

Finalmente resta apresentar o método destinado aos efeitos de pressão gerados pelo BLEVE de cilindros ou cisternas de GPL. O confinamento parcial induzido pela estrutura tunelar leva a que se formem altas sobrepressões no interior do túnel e que essas sobrepressões se façam sentir a grandes

³ Modelo proposto pelo Thornton Research Center nos artigos "A model to predict radiant heat and blast hazards from LPG BLEVE", 1993 e "The Model of BLEVE fireball transients", 1995.

distâncias da fonte. A avaliação integrada neste método assenta na estimação dos valores de pressão de pico recorrendo ao método TNT, usando uma massa equivalente em TNT do produto em causa (GPL, tido como propano para estes fins) e segundo o qual se podem facilmente estabelecer relações pressão-distância.

3.5.4.4. VCE de GPL e combustível líquido

Nesta secção o objectivo é o de dar a conhecer o modelo de avaliação de consequências dos cenários que implicam a libertação de vapores inflamáveis seguidos da ocorrência de uma *Vapour Cloud Explosion*, tanto na situação de transporte de combustível líquido (admite-se gasolina) como de transporte de GPL, cenários 5 e 8 respectivamente. Tenha-se em atenção os valores limite inferior e superior de inflamabilidade, presentes no quadro do Anexo G.

Em túneis, o modelo idealizado começa por avaliar a fonte de vapor e o correspondente desenvolvimento da nuvem, o que é feito segundo procedimento análogo ao já referido para as nuvens tóxicas (3.5.4.2.). A ignição desta nuvem depende essencialmente de dois factores, o intervalo de tempo e o fluxo de ar no túnel. O volume de vapor inflamável aumenta com o tempo embora a sua concentração derive da velocidade do fluxo. Para velocidades baixas, a concentração pode atingir valores superiores ao limite superior de inflamabilidade e activar a chama. Neste âmbito toma-se para tempo de ignição o menor entre o tempo que a frente da nuvem leva até chegar ao extremo de saída do túnel, o tempo de esvaziamento da cisterna ou 10 minutos. A explosão admitiu-se demorar 15 segundos.

As gamas de sobrepressões criadas pela explosão têm grande conexão com a geometria do local do túnel já que quanto maior for o nível de confinamento, maior será o aumento de pressão. No entanto, mesmo que apenas parte da extensão do túnel esteja coberta pela nuvem, os produtos de combustão empurrarão os gases não queimados à sua frente, preenchendo o túnel à medida que a explosão avança (os portais do túnel terão obviamente um papel ventilador). O modelo adoptado faz uma distinção entre condições em que o túnel esteja praticamente cheio pelo gás em expansão e, por contraponto, condições em que essa cobertura é relativamente baixa, definindo um limite para a diferenciação das duas situações. Abaixo desse limite é usado o modelo de massa de TNT equivalente, descrito na secção prévia. Acima do limite o cálculo é feito segundo a formulação de Cubbage and Simmonds (1995) [18] que entra em consideração com várias constantes e parâmetros e que calcula directamente uma sobrepressão média, assumida constante ao longo do túnel.

No que respeita aos efeitos da explosão, a avaliação é levada a cabo da mesma forma que o é para os BLEVE. Empregam-se, de seguida, funções probit para determinação de rácios de fatalidade devido às suas consequências térmicas e de pressão.

3.5.5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE EVACUAÇÃO E SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Como últimas considerações relativamente à compreensão do modelo DG QRAM, opta-se por destinar um subcapítulo à análise que o programa incorpora no que concerne ao procedimento de evacuação e à representação simplificada dos sistemas de ventilação dos túneis. O aprofundamento destes dois parâmetros justifica-se pela importância ímpar que possuem na forma como os cenários evoluem e nas suas consequências. Pretende-se apresentar os princípios e pressupostos mais relevantes inerentes a estas modelações, procurando assimilar a metodologia adoptada.

3.5.5.1. Evacuação em túneis

Define-se por evacuação a habilidade que os ocupantes do túnel têm em se deslocarem para um local seguro, como resultado de um acidente envolvendo materiais perigosos. Avalia-se essa habilidade pelo tempo empregue no deslocamento que, sendo muito variável e subjectivo, é de difícil determinação. Inclui as seguintes componentes:

- Tempo de reconhecimento (t_{rec}), tempo entre o anúncio de perigo nos sistemas e a decisão do ocupante de iniciar o movimento;
- Tempo de resposta (t_{res}), é o tempo de preparação para a evacuação no qual se investiga o melhor caminho, se informam outros ocupantes, se deixa as viaturas, se levantam os pertences;
- Tempo de movimento (t_{mov}), tempo que os ocupantes do túnel levam no movimento directo para a saída ou local seguro; em situações de emergência as velocidades de caminhada estão limitadas;

O tempo de pré-movimento é, então, a soma $t_{rec} + t_{res}$ e pode constituir uma parte significativa do tempo total de evacuação. Note-se que a variabilidade destas componentes do tempo de evacuação está associada à localização dos ocupantes no túnel, ao crescimento dos próprios fenómenos, a proximidade, e o seu conhecimento relativamente ao acidente e sua perigosidade. Estas variáveis conectam-se directamente com o tipo de sistema de alerta disponível, o tipo de ocupação do túnel e a natureza desses ocupantes. O método de cálculo do tempo de pré-movimento assenta no proposto por Sime (1995) [18], que dá valores de 1 a 5 aos parâmetros decorrentes das variáveis mencionadas e que são os que mais afectam os tempos de reconhecimento e resposta. O valor 1 será para a melhor situação e o 5 para a pior. A maioria dos parâmetros tem um valor dado por defeito pelo programa mas alguns terão que ser introduzidos pelo utilizador. É o caso da ponderação dada ao sistema de alerta do túnel que, sendo o mais importante dos parâmetros, é ponderado de forma diferente como se perceberá pela formulação adiante, tendo em conta os dados do quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Categorias de sistemas de alerta [18]

Referência	Descrição
W0	Sem sistema de alerta
W1	Sistema de alerta com sirene
W2	PA (sistema de informação ao público) – mensagens de voz pré-gravadas e/ou informação visual de perigo
W3	PA+CCTV – sistemas de voz em directo e circuito fechado de televisão comandados por uma sala de controlo

Associado o valor de 1 a 5 a todos os parâmetros considerando (ver Anexo H para conhecimento de todos eles) o cálculo efectivo do tempo de pré-movimento faz-se pela seguinte fórmula:

$$T_{pre\,ajust} = t_{pre}(mcp, w) \times w_{eff} \quad (22)$$

O $t_{pre,mcp}$ é o tempo de pré-movimento para o melhor cenário possível associado a cada uma das classes de sistema de alerta. Tais tempos podem ser consultados no quadro 3.11.

O factor w_{eff} é o peso para a ponderação do modo de resposta dos ocupantes que advém da agregação das classificações dadas aos parâmetros tidos em consideração. Calcula-se da seguinte forma:

$$w_{eff} = \frac{5}{m\u00e9dia_{par\u00e2metros}} \quad (23)$$

Quadro 3.11 – Tempos para diferentes cen\u00e1rios de evacua\u00e7\u00e3o referentes a cada classe de alerta [18]

Sistema de alerta	Tempo de pr\u00e9-movimento (t_{pre})		
	Melhor cen\u00e1rio (mcp) (segundos)	Cen\u00e1rio interm\u00e9dio (segundos)	Pior cen\u00e1rio (segundos)
WO	< 300	420	> 720
W1	< 180	360	> 540
W2	< 120	240	> 360
W3	< 60	120	> 180

Ao tempo de pr\u00e9-movimento \u00e9, ainda, necess\u00e1rio somar o tempo de movimento (t_{mov}), que \u00e9 calculado simplesmente dividindo a dist\u00e2ncia a que um ocupante se encontra do local de seguran\u00e7a pela sua velocidade de caminhada, admitida de 0.5m/s.

O resultado do tempo de evacua\u00e7\u00e3o \u00e9 crucial para aplica\u00e7\u00e3o do m\u00e9todo de avalia\u00e7\u00e3o de consequ\u00eancias j\u00e1 que \u00e9 esse tempo o utilizado para tempo de exposi\u00e7\u00e3o. Assim, a dose total de efeitos nocivos (t\u00e9rmicos, t\u00f3xicos, fumos, press\u00e3o etc.) \u00e9 calculada pela integra\u00e7\u00e3o das doses associadas a cada segmento do t\u00fanel de acordo com o tempo levado a atravessar cada um desses segmentos (parte do tempo de evacua\u00e7\u00e3o). A aplica\u00e7\u00e3o dos probits \u00e9 feita sobre a exposi\u00e7\u00e3o assim calculada.

3.5.5.2. Sistema de Ventila\u00e7\u00e3o

O sistema de ventila\u00e7\u00e3o em t\u00fanis \u00e9 uma pe\u00e7a fulcral no c\u00f3mputo do seu sistema de seguran\u00e7a. Ficou patente nos subcap\u00edtulos anteriores relativos \u00e0s avalia\u00e7\u00f5es de consequ\u00eancias f\u00edsicas e fisiol\u00f3gicas que a ventila\u00e7\u00e3o tem uma larga influ\u00eancia na recria\u00e7\u00e3o da grande maioria dos cen\u00e1rios e que depende grandemente deste sistema a magnitude das consequ\u00eancias dos cen\u00e1rios considerados. A necessidade de um sistema de ventila\u00e7\u00e3o bem adaptado \u00e0s necessidades particulares de cada t\u00fanel \u00e9 imperativa. Tais especificidades de dimensionamento passam, entre outras, pelo n\u00edvel e tipologia de tr\u00e1fego e caracter\u00edsticas construtivas (sec\u00e7\u00e3o transversal, comprimento, inclina\u00e7\u00f5es) do t\u00fanel. Por conseguinte, podem elencar-se os principais objectivos de um sistema de ventila\u00e7\u00e3o:

- Remo\u00e7\u00e3o de calor e humidade;
- Remo\u00e7\u00e3o de poeiras e fumos;
- Limitar a concentra\u00e7\u00e3o de gases t\u00f3xicos;
- Providenciar oxig\u00e9nio para respira\u00e7\u00e3o.

Em situações de acidente que produzam cenários de emergência como os recriados neste trabalho, exponecia-se a importância do sistema de ventilação no cumprimento destes objectivos. Este cumprimento pode ser atingido através de diferentes tipos de sistemas, desde os mais simples, de ventilação natural, aos mais complexos, com misturas de vários tipos de ventilação forçada. Passa a explicar-se brevemente os mais importantes.

Os túneis naturalmente ventilados são aqueles que não possuem qualquer tipo de ventoinhas mecânicas de controlo do fluxo de ar interior. Este tipo de ventilação existe em todos os túneis na medida em que de alguma forma se geram sempre fluxos naturais de ar devido as condições atmosféricas. Porém, em alguns túneis este tipo de ventilação é suficiente, por si só, em alguns túneis, não o sendo normalmente quando toca à extracção de fumos gerada por incêndios. Assim, só em túneis inferiores a 500m se usa exclusivamente a ventilação natural.

A ventilação mecânica é usada em todos os casos onde a natural não seja suficiente, mais precisamente em túneis longos e de altos volumes de tráfego. Implica o recurso a ventoinhas destinadas a introduzir os volumes necessários de ar fresco. Basicamente, cada sistema de ventilação é dimensionado para providenciar uma aceitável qualidade de ar em regime normal e em todas as situações de tráfego. Em caso de acidente, deve garantir a segurança dos utilizadores implicados e facilitar as operações de emergência, possuindo para tal um programa destinado a essas situações. Existem três tipos básicos de ventilação mecânica: longitudinal, transversal e semi-transversa.

A característica principal da ventilação mecânica longitudinal é a criação de um fluxo de ar uniforme ao longo do túnel. Nestes sistemas as ventoinhas estão, normalmente, montadas no tecto do túnel, por cima da área de tráfego automóvel forçando o ar limpo a entrar no túnel por um portal e sair pelo outro poluído pelas substâncias emitidas pelos veículos que vai gradualmente acumulando. O caudal do fluxo de ar é, então, constante e tem o sentido do tráfego no caso de túneis com dois tubos, um para cada sentido já que nesta situação o efeito pistão (ar deslocado pelo movimento dos carros) é um contributo favorável ao sistema de ventilação. A grande vantagem da ventilação longitudinal é o seu custo relativamente baixo, tanto na instalação como na operação/manutenção. No entanto, pelo facto de a extracção de fumos em caso de acidente se fazer por um fluxo ao longo do túnel, a grande desvantagem é a inevitável concentração de fumo para um dos lados desse acidente.

Nos outros sistemas mecânicos de ventilação, o ar fresco é injectado e/ou retirado do túnel por condutas construídas propositadamente para o efeito. Em túneis com ventilação transversal o sistema é composto por condutas duplas, uma para injeção de ar fresco e outra para a extracção de ar poluído, podendo localizar-se tanto por cima como por baixo da estrada, sendo usual que o ar fresco seja injectado ao nível da estrada e o ar poluído seja retirado por uma conduta, ao longo do tecto do túnel. A ventilação transversal pura pressupõe a não existência de fluxo longitudinal e, quando em funcionamento em situação de emergência, os sistemas mais modernos prevêm a exaustão localizada dos fumos a partir do ponto onde se deu o acidente. Como tal, a modelação é feita idealizando uma variação linear do caudal ao longo do túnel, em que a inclinação do diagrama representativo depende do saldo entre a injeção de ar fresco e a extracção de ar poluído. É o sistema mais caro de construir e para manter em funcionamento mas, como grande vantagem, apresenta o facto de ser necessário um muito menor tempo de resposta para entrada em funcionamento do regime de emergência e, por isso, um controlo e eficácia muito superiores ao longitudinal.

Por fim resta apresentar os sistemas semi-transversos que consistem na injeção transversal de ar fresco ao longo do túnel através de condutas e na não extracção de ar por condutas. Assim, o ar poluído é transportado longitudinalmente em direcção às extremidades. A desvantagem deste sistema

é que não é possível controlar o fluxo longitudinal, considerando porém que esse fluxo é variável nas diferentes secções do túnel.

A modelação no DG QRAM não é feita intrinsecamente segundo nenhum dos sistemas descritos. A afectação a cada um dos sistemas é feita consoante a forma como são introduzidos os dados nos inputs do programa. Este permite a introdução de dados de dois tipos:

- Fluxo longitudinal de ventilação em cada nó, positivo para fluxos no sentido do tráfego e negativos na situação contrária;
- Fluxo de extracção transversal de ar em cada segmento, não podendo assumir valores negativos;

Assim sendo, o fluxo de injeção de ar fresco é calculado pela ponderação (B_n , do inglês *balance*) entre os fluxos longitudinais ($L_{n-1,n}$ ou $L_{n,n+1}$) e o de extracção transversal (E_n), tendo em conta que o saldo total terá que ser nulo em cada segmento. A figura 3.15 complementa a compreensão do esquema do modelo para um segmento de túnel genérico n .

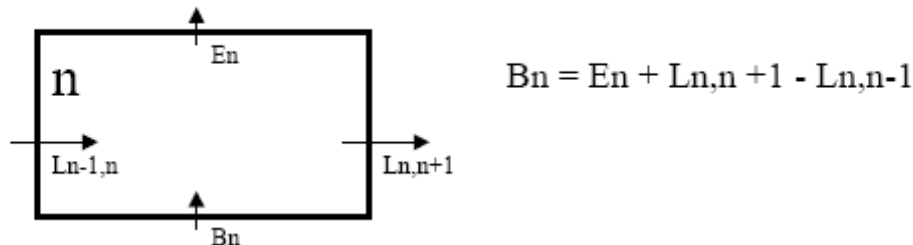


Fig.3.15 – Esquema de modelação do sistema de ventilação [19]

É perceptível nas descrições anteriores que estão previstos dois regimes para a ventilação, o normal e o de emergência. No regime normal os dados de input são os já descritos. Já no regime de emergência, para além desses mesmos dados, há ainda que providenciar ao modelo informação sobre o número de regimes de ventilação de emergência (já que pode ser vantajoso prever diferentes respostas consoante o local e tipo de acidente) e correspondente segmento associado e, ainda, o tempo de activação do regime de emergência.

4

CASOS DE ESTUDO. APLICAÇÃO PRÁTICA DO DG QRAM

4.1. NOTAS INICIAIS

Neste capítulo pretende-se realizar a aplicação do modelo DG QRAM a um caso de estudo, procurando discorrer sobre as particularidades teóricas expostas nos capítulos anteriores, percebendo como são tidos em consideração os vários parâmetros, que simplificações são feitas e qual o seu impacto na modelação. São preteridas as análises detalhadas de cariz informático em detrimento de um entendimento do ponto de vista de um decisor (concessionário de um túnel, autoridade governamental) que pretenda analisar o risco associado ao transporte de materiais perigosos num determinado túnel. Este entendimento sustenta-se, como tal, em considerações técnicas de funcionamento e operação dos sistemas rodoviários e de segurança do túnel, sendo sob este ponto de vista que se fundamentam as conclusões que deste estudo advêm.

Numa primeira fase, é descrita a organização e forma de introdução dos dados de entrada no modelo. Esta é uma tarefa com algum grau de complexidade já que não é líquido que a interpretação dos dados reais seja passível de ser traduzida directamente para o modelo, isto é, há bastantes simplificações a fazer e algumas adopções de valores para parâmetros importantes que não se compadecem com uma escolha aleatória e têm que ser devidamente estudados para que se obtenham resultados precisos e verosímeis. Há, ainda, que adaptar os dados recolhidos à forma como o DG QRAM requer os inputs, ajustando a informação aos condicionalismos e limitações do modelo. São, neste capítulo, explicadas todas essas simplificações e as formas empregues para contornar as limitações de dados ou as impostas pelo próprio programa.

Na segunda fase, centram-se as atenções na análise e discussão de resultados. Partindo dos pressupostos teóricos anteriormente apresentados, é feita a sua aplicação ao caso prático de um túnel, concluindo da sua situação em termos de aceitabilidade de risco e da necessidade de serem introduzidas medidas que possam ser úteis/eficazes na situação concreta. Discute-se a aplicabilidade e adequabilidade dessas medidas, com base nos resultados obtidos e, numa terceira fase é simulada a sua aplicação.

Por fim, realiza-se uma análise de sensibilidade, vulgo análise comparativa da eficácia e sucesso das medidas introduzidas. Esta análise é, imperativamente, crítica e sustentada na medida em que se centra no entendimento dos fenómenos que podem levar àqueles resultados.

4.2. ORGANIZAÇÃO E INTRODUÇÃO DOS DADOS

A base de trabalho para esta aplicação prática foi retirada da informação referente a um projecto de um túnel real. No entanto, essa base serviu apenas de guia para o controlo da plausibilidade dos valores introduzidos, não sendo objectivo primordial reproduzir com exactidão a análise de risco desse túnel. A explicação do processo de introdução de dados, na medida do possível respeitando o ordenamento apresentado no programa, é o objectivo das reflexões seguintes.

4.2.1. DADOS DE BASE

Inicialmente é necessário definir o tipo de resultados que se pretende que sejam produzidos:

- Apenas para vítimas mortais ou vítimas mortais + feridos;
- Apenas para os utilizadores da estrada, apenas para a população local ou para os utilizadores da estrada e população local em conjunto.

Optou-se por realizar esta análise com base no indicador “número de vítimas mortais”, tal como foi já diversas vezes referido nos capítulos anteriores. Este pressuposto baseia-se no facto de ser, evidentemente, risco de morte o mais significativo para as pessoas e, portanto, o mais representativo para análise. A concepção analítica em termos de número de mortos é legítima e, genericamente, bem representativa da magnitude das consequências e das medidas a adoptar embora em certos pormenores possa ser ligeiramente redutora neste aspecto.

Por outro lado, as consequências foram estudadas com base na sua incidência sobre os utilizadores da estrada e apenas esses. A consideração da população faz sentido quando se analisam troços a céu aberto como rotas alternativas à rota em túnel ou quando em presença de túneis com troços abertos. Neste casos é óbvia a influência que um acidente no interior do túnel pode eventualmente ter nas pessoas que residam ou se encontrem nas imediações do túnel. No entanto, o túnel que se idealizou para esta aplicação é contínuo, isto é, as únicas aberturas que possui são as suas extremidades e as dos ramos de entrada/saída do túnel. Isto pode levar a uma reflexão sobre a transmissão de efeitos de um acidente pelos portais. Tal problematização é legítima e admite-se que a análise nestes moldes possa ignorar esse efeito.

Ainda nos dados de base, deve seleccionar-se quais dos **13 cenários** atrás descritos devem fazer parte da análise a realizar. Por princípio, a análise mais completa é aquela que engloba todos os cenários disponíveis. Porém, pode questionar-se da necessidade da introdução de alguns dos cenários tais como o cenário 6, referente ao espalhamento de cloro (o transporte rodoviário de grandes tanques de cloro é liminarmente proibido em muitos países). No presente caso assumiu-se a existência desta proibição. Também nos cenários 1 e 2, referentes aos incêndios de HGV sem matérias perigosas, se podem levantar questões quanto à sua inclusão já que o risco que lhes está associado em túnel é particularmente alto e, em grande maioria das ocasiões, condicionante. No entanto fez-se a opção pela sua inclusão para se tomar em consideração um espectro de riscos mais representativo da realidade.

Assim, todas as análises foram feitas considerando apenas 12 dos 13 cenários possíveis (exclusão do cenário 6).

4.2.2. CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL

Aqui se apresenta o processo de introdução dos inputs relativos às características intrínsecas do túnel, nas suas diversas vertentes.

4.2.2.1. Características geométricas

O primeiro passo é a escolha do número de secções a considerar na modelação. Este é um passo muito importante já que são as secções que subdividem o túnel por um princípio de representatividade das suas características genéricas, essencialmente a secção transversal. Ou seja, pretende-se que a eventual variabilidade da secção transversal ao longo do túnel seja atenuada pela sua divisão em secções com secção aproximadamente constante. Contudo há que referir uma relevante limitação do modelo a este parâmetro, limitação essa que consiste na restrição do número de secções a 6 por túnel, para ambas as direcções (o que equivale a 3 secções por sentido). Na aplicação realizada, o túnel localiza-se em zona urbana central. Por conseguinte a secção transversal é fortemente variável, atipicamente até, quando comparada com outros túneis urbanos. Assim, foi necessário conceber um modo de contornar esta limitação que, *a priori*, parecia poder ser muito condicionante. É esse procedimento que se descreve seguidamente.

O túnel idealizado é um *twin bore*, ou seja em dupla galeria, uma para cada sentido de circulação. A introdução dos dados típica para estas características seguiria um seccionamento em túnel em ambos os sentidos, com o limite acima referido de 6 secções. Tendo em conta que as secções são obrigatoriamente do mesmo tipo em ambas as direcções (se a secção 2 é em túnel na direcção A, também o tem que ser na B) e que não pode haver duas secções seguidas do mesmo tipo, a estrutura-tipo para uma secção em túnel segue a forma apresentada na figura 4.1.

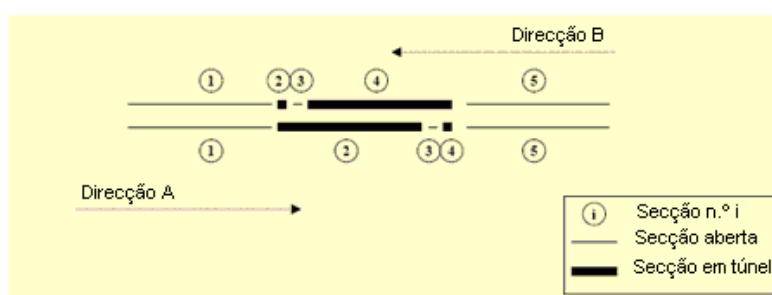


Fig.4.1 – Seccionamento tipo de um túnel com dupla galeria [19]

Porém, este processo típico restringe o número total de secções em túnel a 6. Como tal, o método idealizado para contornar esta restrição consiste na consideração individualizada das duas direcções. Desta forma, correndo o modelo como se a direcção A consistisse num túnel com duas direcções, A_A e A_B , em que A_A é túnel e tem o tráfego total da direcção A e A_B é secção aberta com tráfego nulo. Procedimento idêntico se fez para a direcção B, subdividida em B_A e B_B . O seccionamento segue a esquematização patente na figura 4.2, repetida para as 6 secções em túnel da direcção e, separadamente, para as 6 secções em túnel da direcção B (neste caso deve seleccionar-se a opção de -1 no sentido de tráfego, já que este se processa no sentido oposto à quilometragem do túnel.). Correm-se, assim, dois casos de forma independente em que um é a direcção A do túnel em análise, e o outro é a direcção B. No final, a análise de resultados terá que se basear na sobreposição dos efeitos determinados para cada direcção, juntando assim as duas direcções do túnel num cenário só. Com esta finalidade, desenvolveu-se uma folha de cálculo Excel que agiliza a compilação dos resultados de cada direcção para cada cenário e realiza a soma dos efeitos. Esta ferramenta foi concebida de um modo

genérico o que permite a sua ampla utilização para além do âmbito deste trabalho. No fundo, é uma folha de cálculo complementar ao programa base que permite contornar a limitação de secções que ele impõe e, assim, obter resultados mais fiáveis.

Note-se que as secções curtas representadas nas figuras são secções de extensão nula.

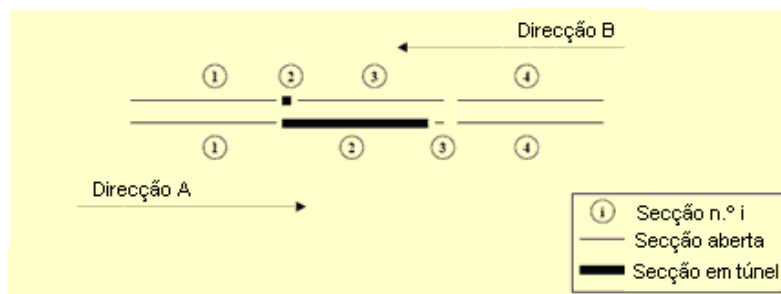


Fig.4.2 – Seccionamento tipo de um túnel com galeria simples numa direcção e aberto na outra [19]

Deve ainda referir-se que a forma de materializar este seccionamento é tão-somente pela introdução de coordenadas dos pontos limite de cada secção. Com esta introdução, é calculada a distância em linha recta entre os pontos, embora, para as secções em curva seja essencial introduzir a extensão real que será, claramente, superior àquela. O esquema da figura 4.3 mostra o seccionamento adoptado em ambas as direcções para o estudo do túnel e respectiva extensão de cada secção.

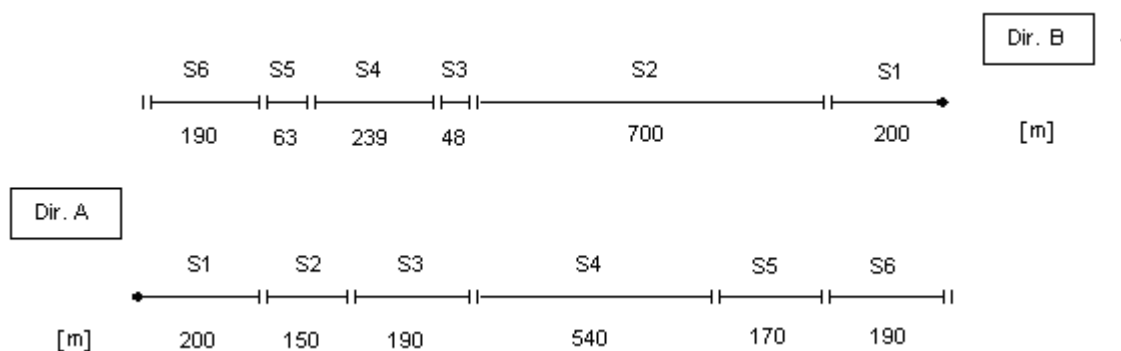


Fig.4.3 – Esquema das secções do túnel estudado

Ficam assim definidas as secções transversais representativas, às quais estão associadas dimensões (altura, largura, área e número de vias) e inclinação transversal constantes. A inclinação longitudinal pode variar ao longo das 6 secções definidas através de uma subdivisão (no programa denominam-se segmentos e as extremidades limitadoras por nós) nas secções já referidas. Os referidos segmentos devem então possuir uma inclinação longitudinal aproximadamente constante sendo igualmente importante fazer coincidir os nós com a localização dos ventiladores para precaver a consideração de perda de fluxo ao longo de cada secção, podendo assim de forma mais correcta, considerá-lo constante.

Apresentam-se nos quadros 4.1 e 4.2 a definição das secções para ambas a direcção A e B, respectivamente. No anexo I podem ser consultadas as características geométricas da secção 1 da direcção A (para as restantes secções o programa gera tabelas semelhantes).

Quadros 4.1 e 4.2 – Definição das secções concebidas (direcções A e B)

Section #	Tunnel? (0=NO) (1=YES)	X (m)	Y (m)	Straight line (m)	User defined length (m)
0		484	0		
1	1	370	164	200	200
2	0	370	164	0	0
3	1	285	287	150	150
4	0	285	287	0	0
5	1	177	443	190	190
6	0	177	443	0	0
7	1	0	936	524	540
8	0	0	936	0	0
9	1	69	1090	169	170
10	0	69	1090	0	0
11	1	162	1255	189	190
12	0	162	1255	0	0

Section #	Tunnel? (0=NO) (1=YES)	X (m)	Y (m)	Straight line (m)	User defined length (m)
0		484	0		
1	1	484	0	0	0
2	0	370	164	200	200
3	1	370	164	0	0
4	0	11	758	694	700
5	1	11	758	0	0
6	0	0	804	47	48
7	1	0	804	0	0
8	0	42	1037	237	239
9	1	42	1037	0	0
10	0	73	1091	62	63
11	1	73	1091	0	0
12	0	162	1255	187	190

4.2.2.2. Ventilação e drenagem

A forma como é modelada a ventilação foi já explicitada no capítulo 3. O túnel possui apenas ventilação longitudinal (baterias de 2 ventoinhas) sem extracção de ar. No seu regime normal, cada ventoinha produz um fluxo de $8,9\text{m}^3/\text{s}$ o que resulta num caudal constante ao longo do túnel de $17,8\text{m}^3/\text{s}$. No portal de entrada o fluxo é nulo. Já para a situação de emergência, considera-se que a potência de cada ventoinha duplica (fluxo de $35,6\text{m}^3/\text{s}$). O tempo que leva até que a ventilação de emergência esteja a funcionar na potência máxima foi assumido como sendo de 6min (valor plausível com o verificado na maioria dos sistemas encontrados no mercado – ver justificação para este valor em 1.2.2.3.).

Quanto à drenagem, há que definir no modelo um sistema discretizado de pontos de drenagem das águas. Tal é conseguido através da introdução da área aberta de cada grelha e o intervalo entre elas. Definiu-se um valor de $0,05\text{m}^2$ por grelha, com um espaçamento de 1m.

4.2.2.3. Segurança e estrutura

Nas medidas de segurança, deve introduzir-se o espaçamento entre portas de emergência e o tipo de comunicação de emergência presente (sirene de aviso, sistema de informação aos utilizadores ou este sistema aliada a um circuito fechado de televisão – CCTV). No caso concreto, o espaçamento de portas é de 200m e a segurança é o sistema que alia informação com o CCTV). Adicionalmente, é muito importante definir o tempo para que o acesso de veículos ao túnel seja vedado. Este tempo compraz o tempo que leva até à detecção do incidente por parte do sistema de segurança, o tempo que o técnico presente no centro de segurança leva até se aperceber do problema e o tempo de fechamento da cancela. É geralmente aceite, para as duas primeiras componentes, um tempo entre 1,5 e 2min, dependendo do tipo sistema de segurança (sirenes, informação, CCTV, sensores de fumos etc.). Para ser conservativo tomam-se os 2min (apesar de a segurança concebida para este túnel ser completa),

aos quais se devem somar 10seg de fechamento da cancela. O tempo de activação da ventilação de emergência deve, segundo [15], ser cerca de 3 a 4min superior.

No capítulo estrutural, os parâmetros mais importantes a ter conta são o tipo de solução construtiva utilizada, que terá repercussões na análise de consequências estruturais. A solução preconizada para este túnel é a de *cut and cover*, implicando secção transversal rectangular e um esqueleto estrutural apoiado com maior complexidade do que a solução de construção por tuneladora.

Ainda na caracterização estrutural, é de realçar a alta resistência ao fogo prescrita para os materiais construtivos (resiste a 1200°C durante 240min).

4.2.3. CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO

O primeiro passo a executar para a definição das características do tráfego a considerar na modelação é a divisão do dia por períodos nos quais, claramente, a composição do tráfego varie de forma significativa. O DG QRAM permite a consideração de 1, 2 ou 3 períodos correspondentes a tráfego normal, normal e nocturno e de pico, normal e nocturno. O estudo de tráfego que baseou a análise que agora se leva a cabo definiu a opção de 3 períodos de tráfego durante o dia como a mais indicada para representar a variabilidade na composição do mesmo. A cada período aqui considerado, tem que ser associado um rácio do dia que fraccione o período em horas cobertas. Assim:

- Período Normal: rácio de 0.375 do dia, corresponde a 9h;
- Período de Silêncio (Nocturno): rácio de 0.375 do dia, corresponde a 9h;
- Período de Pico: rácio de 0.25 do dia, corresponde a 6h.

Para cada um destes períodos é, ainda, imprescindível definir a composição do tráfego, começando pela atribuição de valores para o número médio de pessoas por tipo de veículo (ligeiro, HGV ou Bus). Assim vem:

Quadro 4.3 – Ocupação média de cada tipo de veículo por período do dia

	Ligeiros	HGV	Bus
Normal	1,5	1,1	40
Silêncio	1,4	1,1	40
Pico	1,6	1,1	40

A composição do tráfego relativamente a HGV (DG HGV) que transportem matérias perigosas e a proporção de cada tipo de matéria perigosa no tráfego de DG HGV são, também elas, dados de entrada. Estes dados implicam, como se percebe, um elevado detalhe do estudo de tráfego, sendo certo que em Portugal não se fazem estudos de tráfego com esta minuciosidade. Da análise de vários estudos de tráfego a nível Europeu que disponibilizassem esta informação, concluiu-se que um rácio de 1,5% de DG HGV no tráfego de HGV total é um valor plausível. Estudos no Reino Unido apontam para valores superiores, no entanto os restantes Europeus andam à volta deste valor. Quanto à proporção de cada tipo de matéria perigosa no tráfego DG HGV, a não posse destes dados obriga à utilização por defeito dos valores Franceses, disponibilizados pelo QRAM.

As velocidades de circulação médias para cada tipo de veículo são um input igualmente dependente do período do dia a que se referem. Os valores adoptados foram os presentes no quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Velocidades de circulação para cada tipo de veículo por período do dia

	Ligeiros	HGV	Bus
Normal	60	50	50
Silêncio	70	60	60
Pico	45	40	40

Finalmente, a composição de tráfego, traduzida em veículos por hora, usada para a análise de risco no túnel idealizado para aplicação prática deste trabalho foi a patente no quadro 4.5, na página 78. Uma vez mais essa composição divide-se por tipo de veículo, por período do dia e por sentido de tráfego. Divide-se ainda por secção, em correspondência com as 6 secções consideradas em cada sentido. Note-se que as discrepâncias de valores entre as secções num mesmo sentido devem-se à existência de vias de acesso para entradas e saídas do túnel ao longo da sua extensão. Na direcção A há apenas uma entrada entre a secção 4 e 5 e, como tal, o tráfego aumenta nesta transição. Já na direcção B, há uma saída entre a secção 3 e 4, diminuindo o valor do tráfego nessa transição, e uma entrada entre a secção 5 e 6, aumentando aí o tráfego.

Deve ainda referir-se a introdução no modelo de uma correcção destinada a assumir que os condutores de DG HGV são mais cuidadosos e precavidos que os restantes, correcção traduzida pela consideração de valores de taxa de acidentes DG HGV inferiores aos HGV, valores esses dados por defeito no modelo.

Quadro 4.5 – Composição do tráfego no túnel em estudo

	Seção 1			Seção 2			Seção 3			Seção 4			Seção 5			Seção 6		
	Ligeiros	Pesados	Bus	Ligeiros	Pesados	Bus	Ligeiros	Pesados	Bus	Ligeiros	Pesados	Bus	Ligeiros	Pesados	Bus	Ligeiros	Pesados	Bus
Normal (9h)	4245	159	20	4245	159	20	4245	159	20	4245	159	20	4754	191	24	4754	191	24
Sentido A																		
(veic./h)	4245	159	20	4245	159	20	4245	159	20	3316	109	13	3316	108	13	4754	191	24
Sentido B																		
Noite (9h)	1714	76	9	1714	76	9	1714	76	9	1714	76	9	1920	91	11	1920	91	11
Sentido A																		
(veic./h)	1714	76	9	1714	76	9	1714	76	9	1337	52	6	1337	52	6	1920	91	11
Sentido B																		
Porta (8h)	5108	201	25	5108	201	25	5108	201	25	5108	201	25	5721	242	30	5721	242	30
Sentido A																		
(veic./h)	5108	201	25	5108	201	25	5108	201	25	3988	136	17	3988	137	17	5721	242	30
Sentido B																		

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS. CASO BASE.

Explicadas que estão as premissas conducentes à boa organização dos dados de entrada, pode passar-se seguidamente à análise de resultados através do estudo detalhado dos *outputs* produzidos pelo DG QRAM.

Comece-se por atentar no quadro 4.6 que compila as informações referentes às características do túnel.

Quadro 4.6 – Resumo das características base principais do túnel idealizado

Característica Base	Unidade	Valor
Comprimento	m	1440
Número de galerias	-	2
Direcção	-	1 sentido
Saídas de emergência (espaçamento)	m	200
Drenagem (espaçamento)	m	1
Drenagem (abertura)	m ²	0.05
Ventilação (tipo sistema)	-	Longitudinal
Ventilação (regime Normal)	m ³ /s	8,9 x 2 = 17,8
Ventilação (regime emergência)	m ³ /s	17,8 x 2 = 35,6
Ventilação (tempo activação emergência)	min	6
Vedação de acesso (tempo)	s	130

Procede-se de seguida à apresentação dos resultados obtidos e respectiva análise. Tal será efectuado, numa primeira abordagem, em termos do risco global e sua comparação com um critério de aceitação. Considere-se a figura 4.4 que representa a curva F-N do túnel idealizado referente à soma de todos os cenários envolvidos na análise (risco global tido como a soma dos riscos parciais, somando-se, para cada um dos cenários considerados, as frequências associadas a cada nível de consequências).

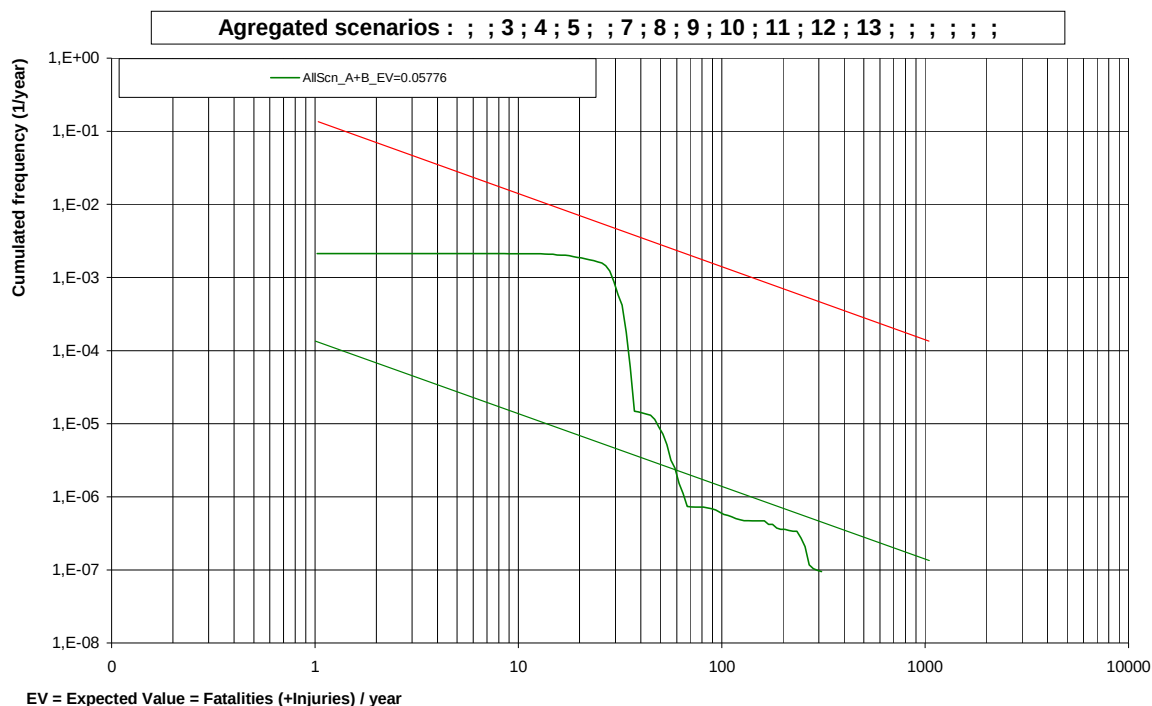


Fig.4.4 – Curva F-N definidora do risco global do túnel idealizado

As duas rectas representam o critério de risco adoptado. Optou-se pela utilização do critério de risco Austríaco, definido pelos seguintes parâmetros da fórmula (5), capítulo 2:

- Limite superior, a vermelho – $A = 0,1$; $k = 1$;
- Limite inferior, a verde – $A = 0,0001$; $k = 1$.

Afigura-se muito relevante tecer algumas considerações sobre este critério. Recupere-se a fórmula (5), definida por $F = A \cdot N^{-k}$. Sem dificuldade se constata que as rectas representadas no gráfico da figura 4.4 não são exactamente as definidas pelos parâmetros mencionados. Senão note-se:

$$\text{Para } N = 1 \quad \longrightarrow \quad F = 0,1 \times 1^{-1} = 0,1 = 1 \times 10^{-1}$$

No entanto, a observação da recta a vermelho permite verificar que a ordenada na origem não é 1×10^{-1} , mas sim um valor ligeiramente superior. É-o devido ao facto de a formulação definidora do critério de aceitabilidade de risco (social, ver capítulo 2) estar estandardizada a número de mortos por quilómetro, isto é, a frequência assim obtida é a frequência de ocorrerem N mortos por Km. Como tal, a ordenada na origem é definida por (extensão do túnel representada por d , neste caso 1440m):

$$\begin{aligned} \text{Para } N = 1 \quad \longrightarrow \quad F &= 0,1 \times (N/d)^{-1} \\ F &= 0,1 \times 1,440 / 1 \\ F &= 1,440 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

A ordenada na origem é, então, aproximadamente $1,440 \times 10^{-1}$ ($\log(1,440 \times 10^{-1}) = -0.841 > \log(1 \times 10^{-1}) = -1$), o que corrobora o que está patente no gráfico. Raciocínio análogo foi feito para o limite inferior.

Numa primeira análise pode dizer-se que o caso base não entra na zona de risco intolerável, visto que nunca intersecta a recta do limite superior, a vermelho. Todavia, a curva F-N está dentro da zona de risco tolerável, na qual a introdução de medidas redutoras deve ser estudada, apresentando até, em

determinada zona, uma grande proximidade do limite superior. A introdução dessas medidas será objecto de estudo adiante. Para já, é importante aprofundar um pouco mais a análise deste caso, com base noutros factores. Observe-se o valor de risco expectável (EV, *Expected Value* no gráfico) que não é mais do que a esperança matemática de ocorrência (de fatalidade, neste caso) e se traduz pela área debaixo do gráfico (integral da função). O EV cifra-se em 0,05776, aproximadamente $5,8 \times 10^{-2}$, o que significa que nas condições definidas estará associado ao túnel um risco de cerca de 5,8 mortos por cada 100 anos.

A introdução destas medidas não deve ser feita de modo aleatório. Antes deve ser uma decisão fortemente sustentada num estudo que permita maximizar o seu efeito redutor de risco. Como tal, deve, em primeira instância, levar-se a cabo uma abordagem que permita a percepção de qual ou quais os cenários que mais estão a contribuir para este risco elevado. Esta abordagem permitirá uma reflexão mais segura sobre que tipo de medidas devem ser introduzidas no sistema pois possibilita o entendimento acerca de quais os fenómenos mais condicionantes e, por conseguinte, quais as melhores medidas para actuar sobre eles. Contudo, a forma como os resultados foram, até ao momento apresentados, não permite esta distinção, já que os mostra num formato global, indistinto para cada cenário de acidente considerado. Assim, é necessário recorrer a um outro formato, no qual seja mostrada a curva F-N associada a cada um dos cenários tidos em conta e o seu respectivo EV (dos 12 analisados há 5 cujo EV é nulo, pelo que não aparecem representados no gráfico). Tal formato está patente no gráfico da figura 4.5.

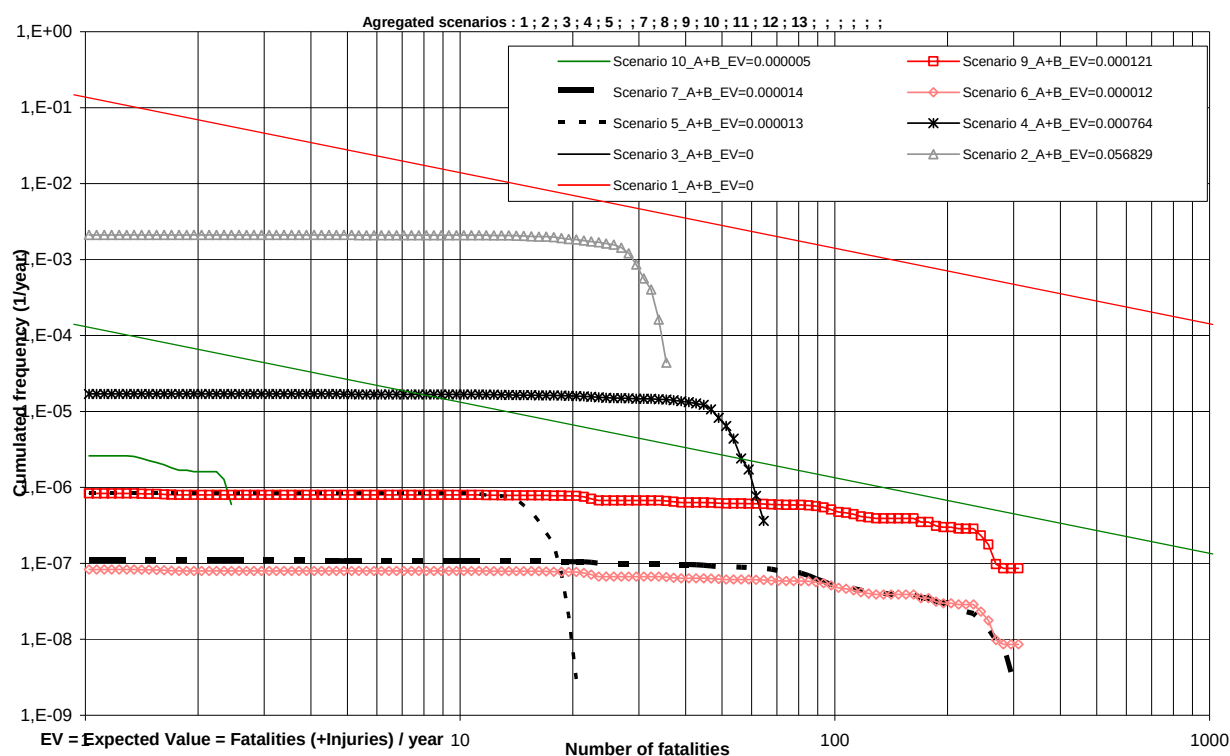


Fig.4.5 – Curva F-N definidora do risco associado a cada cenário para o túnel idealizado

A análise do gráfico dá claramente a entender que é o cenário 2, relativo ao incêndio de 100MW de HGV sem mercadorias perigosas, o mais condicionante. Esta é uma situação de certa forma

coincidente com o esperado. Na verdade, não é em vão que aquando da definição dos dados de entrada no modelo, no passo em que é suposto escolher os cenários a considerar na análise, o programa pergunte especificamente se se querem integrar os cenários de incêndio de HGV, 1 e 2. Ao optar pela sua integração, o utilizador assume que pretende uma análise de risco que vá para além do âmbito do transporte de matérias perigosas e deve esperar que aqueles cenários sejam os mais preponderantes.

Porém, é indispensável deixar algumas notas sobre este assunto. A modelação de cenários de incêndio de HGV restrita a apenas duas hipóteses de potência calorífica do mesmo (20 e 100 MW) parece ser muito redutora na medida em que estes valores são muito extremados. O de 20 MW, cenário, possui um risco negligenciável ($EV = 0$). O de 100 MW é, de longe, o cenário que envolve maior risco. Afigura-se como clara a necessidade de considerar um cenário de potência intermédia entre estes extremos, mais ainda quando se sabe que a modelação é conservativa nesta matéria, isto é, faz reflectir nas consequências do cenário de 100 MW todas aquelas associadas a putativos incêndios de potência superior a 30 MW. No entanto, o modelo não permite este melhoramento por parte do utilizador.

Na mesma linha de raciocínio crítica em relação à forma como é modelado o cenário 2, deve reflectir-se também a assunção de que se atinge a potência máxima instantaneamente 3 minutos após o início do incêndio, simplificação apresentada com detalhe em 3.5.4.1. Esta consideração vem agravar ainda mais as já por si graves consequências do cenário, dado que, na realidade, há um gradual aumento da potência radiada até que se atinja o pico (admitido ocorrer aos 10 minutos). Adicionalmente, a suposição de potência constante e máxima durante os 60 minutos durante os quais se admite que o fogo lavra é drasticamente conservativa. Este condicionalismo seria ultrapassado com um modelo mais detalhado que permitisse a concepção de um incêndio cuja potência variasse no tempo, aproximando-se dessa forma da realidade.

Dos efeitos mais proeminentes deste cenário, destacam-se no quadro 3.9 o calor e o fumo. Tendo este facto em conta, mais ainda se sustenta a abordagem exageradamente pelo lado da segurança seguida pelo DG QRAM já que se consegue relacionar a proliferação destes efeitos sobre as pessoas com as hipóteses que esta têm de lhes escapar ou que o sistema de segurança, mais especificamente a ventilação de emergência, tem para lhes fazer frente. Nesta lógica, é-se induzido a concluir que as medidas redutoras a introduzir têm que incidir sobre estes efeitos, justamente porque eles são os mais significativos dentro do cenário mais preponderante. Assim se faz a ponte para o passo seguinte na aplicação prática aqui realizada.

4.4. INTRODUÇÃO DE MEDIDAS REDUTORAS DE RISCO. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.

Neste subcapítulo o objectivo é o de aplicar ao túnel idealizado medidas que conduzam à redução dos valores de risco verificados no caso base descrito nas secções antecedentes. Primeiramente será apresentado o modo como se materializa a incorporação no modelo de tais medidas e, posteriormente, far-se-á uma análise de sensibilidade com o objectivo de avaliar os efeitos que advêm dessa introdução.

4.4.1. APRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS REDUTORAS

Relativamente ao transporte de mercadorias perigosas por túneis, um largo número de medidas redutoras do risco associado a esse transporte pode ser implementado. Pretende-se aqui apresentar que tipo de medidas existem e quais as características genéricas daquelas consideradas mais relevantes.

As medidas redutoras de risco podem dividir-se em dois grandes grupos:

- Medidas nativas, são aquelas que são realmente tidas em conta na modelação realizada pelo DG QRAM, isto é, aquelas que, de forma directa, o programa permite que sejam consideradas como variáveis;
- Medidas não nativas, são aquelas que o QRAM não tem directamente em conta, isto é, são medidas cujo efeito não é explicitamente avaliável pelos resultados de uma análise de sensibilidade baseada numa modelação via QRAM.

O presente estudo assenta no controlo das medidas nativas e seus efeitos na modelação. No entanto, parece importante deixar algumas anotações relativas às medidas não nativas. A influência efectiva destas medidas não pode, como se afirmou, ser avaliada pelo programa em causa. Assim, para consideração e aferição dos efeitos destas medidas há que recorrer à incorporação de ajustes externos às estimações base do modelo. A dificuldade desta tarefa reside na criação de um procedimento claro, objectivo e fiável que permita que tal avaliação se faça já que, sem um procedimento com essas características a aplicação de medidas não nativas é sempre algo subjectiva. Na realidade, há sempre um certo grau de subjectividade associado à consideração deste tipo de medidas visto que os procedimentos para a sua aferição são, geralmente, de base qualitativa, assente em juízos de conhecedores na matéria. Vários foram os investigadores que se debruçaram neste campo, nomeadamente os referidos em [15]

No quadro 4.7 apresentam-se, indiscriminadamente quanto à tipologia nativas ou não nativas, algumas das principais medidas redutoras de risco.

Quadro 4.7 – Medidas redutoras de risco [15]

MEDIDAS PARA REDUZIR A PROBABILIDADE DE UM ACIDENTE		
Relacionadas com o projecto e manutenção do túnel		
Secção transversal do túnel	Alinhamento Iluminação (normal)	Manutenção Pavimentação
Relacionadas com o tráfego e os veículos		
Limite de velocidade Proibição de ultrapassagem	Escolta Distância entre veículos	Verificação dos veículos
MEDIDAS PARA REDUZIR AS CONSEQUÊNCIAS DE UM ACIDENTE		
Alerta, informação, comunicação do operador e serviços de salvamento		
Televisão em circuito fechado Detecção automática de incidentes	Detecção automática de incêndio Comunicação via rádio	Identificação automática de veículos <i>Telefones de emergência</i>
Comunicação com os utilizadores		
Telefones de emergência <i>Comunicação via rádio (utilizadores)</i>	Sinais de alarme	Altifalantes

Evacuação/Protecção dos utilizadores		
Saídas de emergência	<i>Iluminação (de emergência)</i>	
Controlo de fumos	Equipamento resistente ao fogo	Gestão de incidentes
Redução da magnitude do acidente		
Equipamento de combate a incêndio	Drenagem	Plano de acção de emergência
Equipas de salvamento	<i>Pavimentação (não porosa)</i>	<i>Escolta</i>
Redução das consequências para o túnel		
Estruturas resistentes ao fogo	Estruturas resistentes à explosão	

Por razões que se prendem com limitação de ferramentas disponíveis e de objectividade do presente estudo dissertativo, este centra-se na utilização de medidas nativas. Estas incluem, genericamente, os parâmetros de entrada relativos às características do túnel descritos em 1.2.2. (resistência ao fogo e explosão, controlo de fumos e ventilação, drenagem, saídas de emergência, atraso para vedação das entradas do túnel e atraso para sistema de ventilação de emergência funcionar). As considerações em 1.3 orientam a aplicação que agora se leva a cabo no sentido de actuar sobre os efeitos do calor e dos fumos, largamente dependentes do sistema de ventilação e da evacuação. Desta forma, será com estas duas medidas que se irá trabalhar na análise de sensibilidade, criando três casos alternativos para estudo:

- Caso 1 – alteração ao caso base apenas no sistema de ventilação que passa a contar com baterias de 5 ventoinhas com capacidade de gerar um fluxo de $19,5\text{m}^3/\text{s}$ por cada ventoinha ($97,5\text{m}^3/\text{s}$ no total) em regime normal e $39\text{m}^3/\text{s}$ ($195\text{m}^3/\text{s}$ no total) em regime de emergência em vez das baterias de 2 ventoinhas menos potentes anteriormente empregues;
- Caso 2 – alteração ao caso base apenas do espaçamento entre portas de emergência, que passa dos 200m para os 100m;
- Caso 3 – conjugação dos casos 1 e 2, com ventilação mais potente e portas de emergência menos espaçadas relativamente ao caso base.

Quadro 4.8 – Descrição dos casos a analisar

		Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ventilação (m^3/s)	Normal	$8.9 \times 2 = 17.8$	$19.5 \times 5 = 97.5$	17.8	97.5
	Emergência	$17.8 \times 2 = 35.6$	$39 \times 5 = 195$	35.6	195
Portas de emergência (m)		200	200	100	100

4.4.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Esta análise pode ser levada a cabo por uma perspectiva qualitativa ou quantitativa. Na opção qualitativa analisa-se o padrão de dispersão de efeitos ao longo da extensão do túnel, por exemplo até

que distância do local do acidente se fazem sentir os efeitos do mesmo (mortalidade). Esta opção tira partido do processo de segmentação realizado pela modelação efectuada no entanto, perde representatividade relativamente à opção quantitativa. Como tal, enveredou-se por esta última, fazendo uso das curvas F-N de efeitos somados, para uma análise de cada caso por comparação com o caso base. Posteriormente, é realizada uma análise global em termos de valores de risco expectável, por comparação simultânea de todos os casos.

4.4.2.1. Caso 1

Atente-se na curva F-N representativa deste caso.

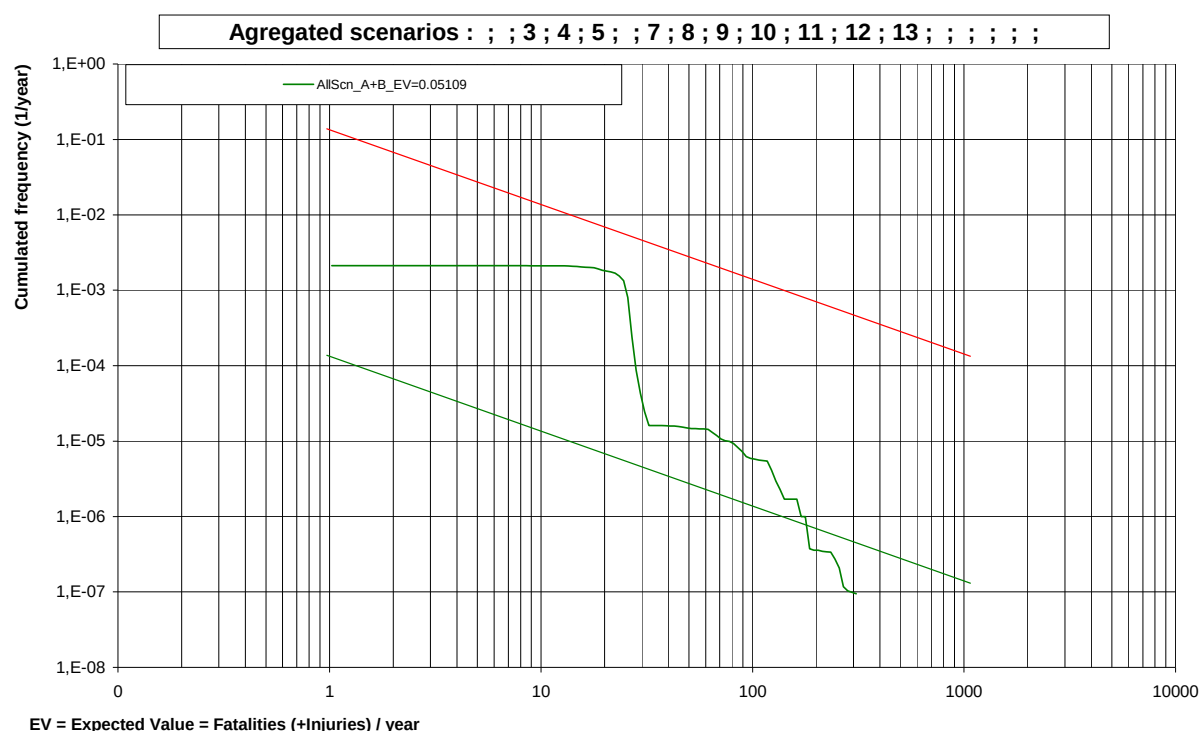


Fig.4.6 – Curva F-N definidora do risco global do Caso 1

A comparação dos gráficos 4.4 e 4.6 não suscita a percepção de grandes diferenças. No entanto, uma análise detalhada permite concluir que, a partir de um certo número de vítimas mortais (20) a curva afasta-se mais rapidamente do limite superior do critério de risco no Caso 1. No entanto, para acidentes com consequências baixas em termos de número de vítimas, as diferenças não se fazem sentir. Por outro lado, na zona da curva correspondente a uma alta mortalidade, a ventilação mais forte chega mesmo a piorar a situação do nível de risco. Uma rápida observação do Anexo J (gráfico com as curvas F-N para todos os cenários) por comparação com o gráfico 4.5, permite perceber que os cenários que mais se alteram nessa zona são os produtos inflamáveis líquidos (cenários 4 e 5) o que se deve, provavelmente, ao facto de a ventilação ser, nesses casos, um factor intensificador do fogo por introduzir oxigénio na combustão.

Conclui-se que o aumento preconizado na ventilação tem um efeito positivo na redução do risco, embora esse efeito seja muito ligeiro. Este ténue efeito está, certamente, relacionado com o facto de a ventilação inicial (regime normal) não ter velocidade suficiente para evitar o fenómeno de *backlayering* explicado em 3.5.4.1. Na verdade, a secção transversal do túnel considerado, apesar de

muito variável, é sempre de uma área muito elevada (entre 100 e 200 m²). Mesmo com o significativo aumento de caudal, este afigura-se como não sendo suficiente para gerar as velocidades de fluxo em regime normal necessárias à rápida dissipação desse fenómeno (a bibliografia especializada refere valores para essa velocidade crítica de cerca de 2m/s [15]). A entrada em funcionamento do potente sistema de emergência terá, numa primeira fase, uma contribuição negativa na dissipação. De facto, este irá misturar a camada de fumo que se acumula a montante do acidente, fazendo-a baixar. A perigosidade deste fenómeno é evidente, com consequências nefastas na perda do sentido de orientação e inalação de fumos por parte das pessoas envolvidas. Só depois de estar a funcionar na totalidade, o sistema de ventilação de emergência será capaz de dissipar o *backlayering* formado, o que evidencia a alta dependência deste fenómeno do tempo necessário para que o sistema passe a esse regime.

Quanto ao outro efeito do cenário 2, o do calor, ele não é afectado directamente pela ventilação. As apreciações quanto à consideração destes efeitos foram já feitas mas não se deve deixar de salientar que é difícil indicar qual dos efeitos está a ser mais severo. De facto, pela comparação de gráficos percebe-se que as grandes diferenças residem na zona intermédia de mortos, na forma como nesta zona a curva cai mais abruptamente quando a ventilação é aumentada. Por outro lado, os valores de F para os extremos de N (poucos ou muitos mortos) não se alteram muito com o reforço de ventilação, tendência que leva a crer que nessas zonas o efeito que prevalece é o do calor. Este raciocínio está de acordo com as considerações efectuadas anteriormente sobre a modelação deste cenário na medida em que, aos 3 minutos, quando se assume que o fogo atinge a sua máxima intensidade, haverá ainda veículos com gente nas imediações do acidente que não conseguiu proceder a evacuação e sofrerá nesse momento, segundo o modelo de forma instantânea, a radiação de um incêndio de 100 MW, incomportável para um ser humano se dele estiver perto. Na modelação para o caso de esses veículos serem Bus (40 pessoas em média) o valor do número de mortos dispara para esse efeito. Esta explicação procura sustentar a constância dos valores extremos de mortos para o cenário 2 e a sua alteração numa zona muito localizada.

De referir finalmente que os cenários de BLEVE e VCE não têm variação visível. Os cenários mais afectados são, como esperado, os de incêndio e de libertação de tóxicos, como se pode comprovar pela consulta das curvas F-N de cada cenário, presentes no Anexo J.

4.4.2.2. Caso 2

A figura 4.7 documenta a curva F-N global para o Caso 2.

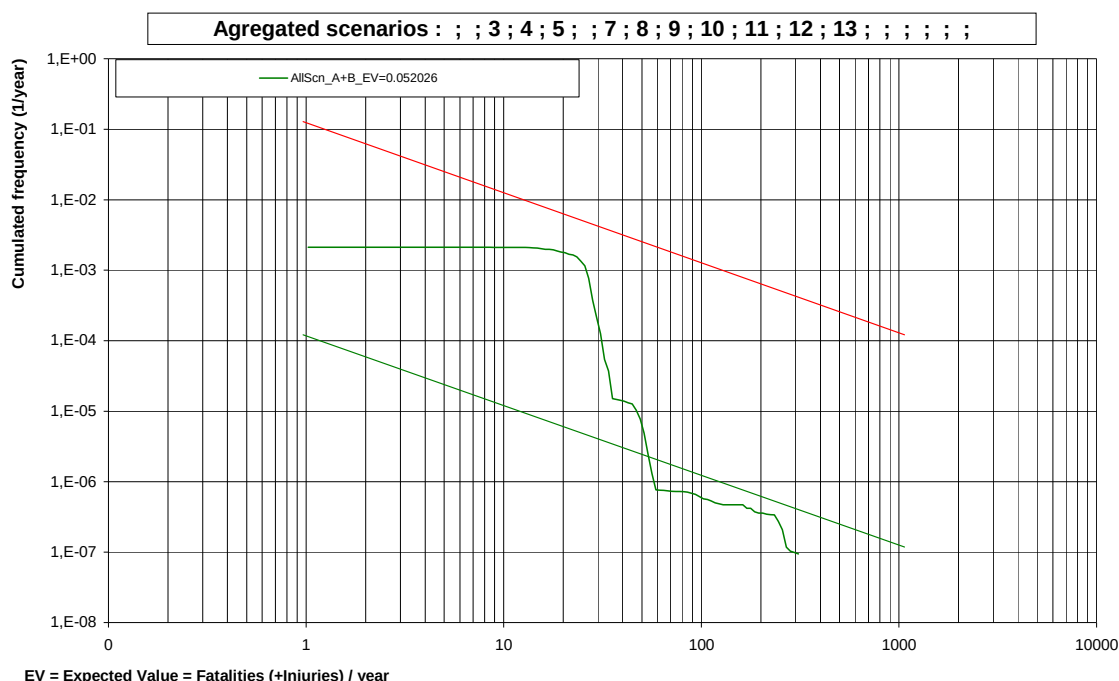


Fig.4.7 – Curva F-N definidora do risco global do Caso 2

As diferenças são, uma vez mais, muito ténues. Analisando em pormenor, a curva do Caso 2 afunda mais rapidamente a seguir ao $N=20$. A única diferença perceptível é mesmo essa, já que no resto do gráfico parece haver uma quase coincidência. As razões que se podem apontar para esta situação são as mesmas vistas para o caso 1, embora aqui com uma mais evidente incidência do fenómeno de *backlayering*, já que a ventilação normal tem um fluxo muito inferior no caso 2. Nesta conjuntura, o encurtamento da distância entre as portas de emergência tem uma grande relevância no princípio do fenómeno de *backlayering* mas produz reduzidos efeitos posteriormente já que o fumo com camadas misturadas a uma altura de menos de cerca de 1,5m do chão leva à desorientação espacial das pessoas e, consequentemente, à sua incapacitação para se dirigirem às saídas. A iluminação das portas e do caminho a percorrer até elas pode ter aqui um papel importante apesar de, a partir de determinado nível de concentração, essa iluminação ser ineficiente.

Os cenários que mais sofrem alterações são, na globalidade, os mesmo que no caso 1 devido à influência sobre o efeito fumo (veja-se o Anexo K).

4.4.2.3. Caso 3

Observe-se a figura 4.8 representativa da curva F-N para o caso 3.

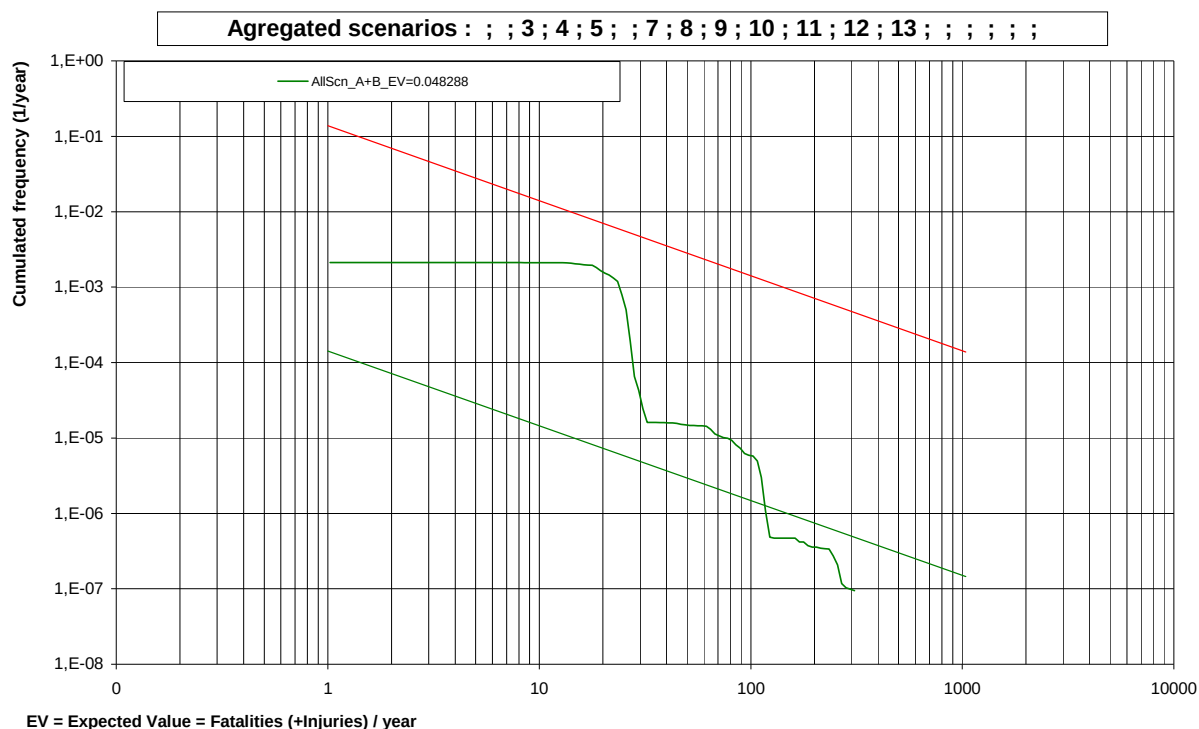


Fig.4.8 – Curva F-N definidora do risco global do Caso 3

O caso 3 corresponde à sobreposição dos casos 1 e 2 e, como tal, os efeitos redutores de risco estão mais visíveis na curva que lhe diz respeito. Este facto está de acordo com o esperado pois há uma complementaridade entre as medidas. A redução dos efeitos de *backlayering* geradas pelo aumento da ventilação faz com que as pessoas estejam menos tempo expostas aos efeitos dos fumos. Havendo mais portas de emergência, esse processo decorre com facilidade superior. (as portas actuam mais na altura em que há *backlayering* e os fumos ainda não desceram o suficiente para afectar a visibilidade das pessoas, o que lhes dá tempo para chegarem mais rapidamente às portas, tanto mais quanto menos espaçadas as portas estiverem).

Comparativamente com o caso base, a curva de risco afasta-se significativamente do limite superior do critério de risco o que atesta da eficácia do uso destas medidas em conjunto. Ainda assim, a magnitude da redução de risco fica, também neste Caso 3, aquém das expectativas.

Os cenários que mais sofrem alterações são os já mencionados anteriormente, embora agora sejam mais perceptíveis as alterações essencialmente no que diz respeito ao afunilamento da curva na zona intermédia, referente aos efeitos de fumo. Tal deve-se à sobreposição dos efeitos referidos previamente (veja-se o Anexo L).

4.4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O quadro 4.9 resume os valores do risco expectável para cada caso considerado e para os cenários mais relevantes.

Quadro 4.9 – EV para cada caso e cenário

Cenário	Todos	2	4	5	7	8	9	10
Caso Base	5,776E-02	5,683E-02	7,646E-04	1,310E-05	1,211E-05	1,404E-05	1,211E-04	5,334E-06
Caso 1	5,109E-02	4,948E-02	1,439E-03	1,796E-05	1,211E-05	1,396E-05	1,211E-04	5,334E-06
Caso 2	5,203E-02	5,113E-02	7,318E-04	1,310E-05	1,176E-05	1,404E-05	1,176E-04	5,334E-06
Caso 3	4,829E-02	4,681E-02	1,309E-03	1,796E-05	1,176E-05	1,396E-05	1,176E-04	5,334E-06

Através da análise dos valores contidos no quadro anterior podem tirar-se algumas conclusões importantes. Os valores aí constantes, especificamente os referentes ao risco expectável, permitem corroborar as apreciações realizadas anteriormente, verificando-se que, relativamente ao caso base, os 3 casos alternativos apresentam EV inferior, sendo o que mais difere do base o caso 3 que aglomera ambas as medidas sob estudo. Percebe-se igualmente que, nas condições do estudo, a ventilação tem um impacto superior às saídas de emergência.

Globalmente, confirma-se a tendência esperada de diminuição dos valores do risco com a introdução de medidas redutoras. Contudo, a eficácia dessas medidas fica longe do esperado em termos de impacto redutor. De facto, a redução do EV entre o caso base e o caso 3, os dois extremos, é de cerca de 16.4% $((4.829 \times 10^{-2} - 5.776 \times 10^{-2}) / 5.776 \times 10^{-2} = -0.164)$.

Numa análise individualizada de cada cenário, verifica-se que é o cenário 2 é, de longe, o mais condicionante. O caso 3 apresenta valores de risco mais reduzidos para cada cenário, não se diferenciando, no entanto, mais do que os 16% do caso base. Ressalve-se desta conclusão o sucedido com os cenários 4 e 5 pelas razões já explicadas relativas à alimentação do incêndio por parte do oxigénio introduzido.

O impacto efectivo das medidas preconizadas é, manifestamente, reduzido. A tendência de redução confirma o princípio que se procurava provar ao realizar este estudo mas a magnitude da redução de risco é claramente insuficiente para, num caso real, se retirar benefício da introdução destas medidas. Esta situação atípica acontece em larga medida devido às especificidades que o túnel considerado encerra. A enorme variabilidade de secção transversal e de inclinações condiciona muito o estudo e particulariza os procedimentos de análise. Como tal, conclui-se que este não é um bom túnel para extrapolar resultados tipo de intervenção com vista à redução de riscos. Por outro lado, permite uma maior sensibilização para a influência que as características geométricas de um túnel podem ter num cenário em que se pretende intervir com o objectivo de mitigar ou diminuir os níveis de risco associado ao transporte de mercadorias perigosas e de incêndio.

Finalmente, ainda no caso concreto em que se centra o estudo, seria necessário numa situação real, procurar outras medidas mais eficazes que permitissem uma mais efectiva redução dos efeitos potenciais de um acidente. De entre as medidas nativas e na linha de raciocínio empregue até aqui, uma actuação óbvia seria no caudal de ventilação no regime normal, procurando que, em cada secção, ele permitisse uma velocidade inicial capaz de combater eficazmente o fenómeno de *backlayering*. Outra medida que iria no mesmo sentido, seria a instalação de ventiladores que reduzissem o tempo dispendido até à sua utilização em máxima potência no regime de emergência. De parte está uma eventual redução da área da secção transversal por diminuição do pé direito do túnel. Esta medida, apesar de fazer subir a velocidade de ventilação, agravaria o *backlayering*, tornando-o mais rápido e transformaria os acidentes com fenómenos explosivos consideravelmente mais graves para a estrutura e pessoas.

De entre o vasto leque de medidas não nativas e pondo de parte a hipótese de proibição ao trânsito de HGV no túnel (medida que acarreta consequências económicas associadas ao desvio da rota muito altas e permanentes), poder-se-ia pensar na proibição de ultrapassagens, na imposição de uma determinada distância de segurança entre HGV durante a sua passagem pelo túnel ou até mesmo a introdução de um sistema de escolta aos HGV que cruzem o túnel. Todas estas medidas advêm da constatação que grande parte dos incidentes em túneis são incêndios e que desses, parte significativa são gerados por colisões (vejam-se estatísticas no início do capítulo 3).

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Serve este capítulo para efectuar uma compilação geral das principais conclusões que, no fim do trabalho conduzido, possam ser tiradas. Num segundo momento, aproveita-se para deixar algumas notas sugestivas para trabalho futuro no âmbito de aprofundamentos que se pretendam fazer ao abrigo dos temas aqui tratados.

Os avanços da engenharia geotécnica e rodoviária permitem que, nos dias de hoje, as soluções rodoviárias com secções em túnel sejam muito frequentes. Tais soluções constituem um enorme ganho de simplicidade no planeamento dos traçados de estradas, sendo que esses ganhos se evidenciam no significativo encurtamento de distâncias percorridas e nas vantagens económicas e sociais que daí advêm. No entanto, como todos os avanços técnicos relevantes para a sociedade, também nos túneis eles representam novos desafios para a comunidade científica, na procura de recursos das mais diversas áreas da engenharia que permitam garantir segurança e boas condições de operação a utilizadores e concessionários.

Após alguns acidentes de extrema gravidade ocorridos em túneis rodoviários, percebeu-se que a magnitude das consequências deste tipo de acidentes poderia ser tal que exigia um muito maior empenhamento na busca de uma segurança generalizada. Multiplicaram-se, então, as iniciativas legais que em diversos momentos reflectiram as orientações dadas pelos grupos de peritos e investigadores nesta matéria. Tais iniciativas, com âmbitos tão diversificados quanto a complexidade do problema a que se queria fazer frente, possuíam o denominador comum de perceber a melhor forma de abordar um problema caracterizado pela dicotomia de probabilidade reduzida e altíssimas consequências. Desta forma é introduzido na área da segurança em túneis, o conceito de Análise de Risco. Essa é uma análise que pode ser feita sob vários pontos de vista, desde os meramente determinísticos aos puramente probabilísticos ou quantitativos. A opção feita pela análise quantitativa justifica-se pela sua maior fiabilidade e mais inteligível tratamento de dados numa fase de projecto, quando a análise de risco é, de facto, uma ferramenta fulcral.

Ao aprofundar o estudo no capítulo do transporte de mercadorias perigosas em túneis rodoviários, pretendeu-se estudar uma matéria cujo domínio não é ainda generalizado sobretudo pela recente consciencialização da importância de estudar estes fenómenos de baixa probabilidade e altas consequências. Designadamente em Portugal não existe, até à data, um conhecimento especializado nesta matéria. Assim, considera-se que o objectivo desta dissertação de criar um documento de genérico que permitisse uma abordagem técnica suficientemente bem estruturada e coerente a todas as vertentes deste problema, foi atingido. De facto, este trabalho faz uma abordagem global às diferentes perspectivas processuais de Análise de Risco, centrando-se depois no estudo e emprego do DG QRAM como ferramenta de suporte para sustentar a análise.

A aplicação realizada com base nos fundamentos teóricos apresentados ao longo do trabalho, teve o principal objectivo de assimilar a forma de lidar com um caso real de gestão de risco, sob o ponto de vista das mercadorias perigosas. Essa tarefa foi profícua na medida em que permitiu assimilar uma forma sistemática de gerir o risco com que se lidou, percebendo os pontos mais importantes do processo lógico de actuação. A sua validade reflecte-se na confirmação das tendências esperadas de redução de riscos, tanto a nível global como particularizando para cada cenário, sendo que a abordagem por este prisma permitiu equacionar quais os efeitos mais preponderantes e as razões dessas circunstâncias.

Não obstante, estiveram subjacentes algumas fragilidades ao nível dos resultados obtidos, nomeadamente no que diz respeito à magnitude do impacte das medidas de mitigação introduzidas. Neste âmbito, foi possível apreender a influência que as características geométricas do túnel têm na qualidade dos resultados obtidos. De facto, o túnel estudado possuía características muito peculiares que não permitem uma extrapolação directa de conclusões, antes obrigam a uma cuidada análise de sensibilidade sobre cada parâmetro. Tal pode ser encarado como um aspecto positivo já que dá a oportunidade de se analisarem inter-relações entre as características de base e os efeitos produzidos, isto é, as interferências entre parâmetros.

Paralelamente foram identificados outros factores condicionantes, mais concretamente limitações do próprio modelo utilizado. As limitações referentes à introdução de dados de input foram contornadas com uma ferramenta desenvolvida para considerar a sobreposição de efeitos de dois túneis, um para cada sentido, permitindo assim seccionar com mais exactidão o túnel em estudo. Limitações referentes à modelação foram igualmente assinaladas, especificamente no que aos incêndios diz respeito, pelo excesso de conservadorismo da metodologia adoptada pelo DG QRAM.

Outros condicionalismos são aqui apresentados sob a forma de sugestões para trabalho futuro para aprofundamento e complementação do que nesta dissertação foi produzido e que possa, de alguma forma, alargar o seu âmbito. O maior desenvolvimento do estudo de caso explorando novas estratégias de mitigação trará, certamente, valiosos acrescentos à investigação. Tais estratégias podem passar pela consideração de medidas de mitigação não nativas (proibição de ultrapassagem, escoltas de HGV, limitação de velocidade ou imposição de distâncias mínimas entre veículos – parte significativa dos incidentes são gerados por acidentes de colisão) ou pelo maior detalhe no estudo de sensibilidade das medidas nativas para que estas possam ser aplicadas com maior eficácia (estudar, por exemplo, um cenário de trânsito congestionado reduzindo a velocidade de tráfego para valores próximos de zero, com o objectivo de destrinçar o efeito da ventilação longitudinal ao empurrar os fumos para jusante onde, por efeito do congestionamento, existem veículos e pessoas sem possibilidade de prosseguir a marcha).

Finalmente, num âmbito bastante mais alargado mas ainda assim com uma evidente utilidade, seria muito interessante sistematizar uma metodologia que conduzisse a uma mais efectiva e exequível análise custo-benefício direccionada para as medidas redutoras de risco, que iria permitir a optimização da decisão sobre a estratégia de mitigação a seguir.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PIARC Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation. *Risk Analysis for Road Tunnels*. World Road Association (PIARC), Paris, 2008.
- [2] Martínez-Montes, G., Cerro-Grau, J. *Análisis y evaluación de riesgo de túneles carreteros en explotación*. Revista Ingeniería de Construcción, Agosto/2007, pág. 101 a 110, Granada.
- [3] Comissão Europeia. *Livro Branco – A política Europeia de transportes no horizonte de 2010: a hora das opções*, 370 final, Bruxelas, Setembro de 2001.
- [4] Directiva 2004/54/CE. Jornal Oficial da União Europeia L167, 29 de Abril de 2004.
- [5] SafeT WP7 Harmonised European Guidelines for Tunnel Safety. *Global Approach to Tunnel Safety*. SafeT, 2006.
- [6] Comissão Europeia. *Memo – Safety in European Road Tunnels*. 2002.
- [7] Decreto-Lei nº75/2006. Diário da República I Série A nº61. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Portugal, 27 de Março de 2006.
- [8] Lima de Azevedo, C., Lourenço Cardoso, J. *Análise de Risco em Túneis Rodoviários*. 2007, LNEC, Lisboa.
- [9] de Weger, D. *Scenario Analysis for Road Tunnels*. Ministry of Public Works and Water Management, Utrecht.
- [10] Molag, M. *Risk Assessment Guidelines for Tunnels*. Safe and Reliable Tunnels. Innovative European Achievements. 2nd International Symposium, 2006, Lausanne.
- [11] Lewis, S. *Risk Criteria – When is low good enough?*. Risktec Solutions Limited, 12/06/2007, 1 a 8, Risktec.
- [12] Holicky, M. *Risk Criteria for Road Tunnels*. Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, 26 e 27 de Março de 2007, Stanford University, Stanford.
- [13] Jonkman, S.N., Vrijling, J.K. *Evaluation of Tunnel Safety and cost effectiveness of measures*. Safety and Reliability – Bedford & van Gelder, 2003, p. 863 a 871, Delft.
- [14] EuroTAP. *Tunnel Audit Final Report*. Outubro de 2007. Munique.
- [15] PIARC, OCDE. *Safety in Tunnels – Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels*. Paris, 2001.
- [16] Comité das Nações Unidas para a Europa. *ADR - European Agreement concerning the Carriage of Dangerous Goods Road*. Janeiro de 2006, Nova Iorque e Geneva.
- [17] INERIS. *Méthodes pour l'évaluation et la prevention des risques accidentels – Le BLEVE*. Setembro de 2002, Paris.
- [18] INERIS. *Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels – Quantitative Risk Assessment Model (versions 3.60 and 3.61). Reference Manual*. 2005.
- [19] INERIS. *Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels – Quantitative Risk Assessment Model (versions 3.60 and 3.61). User's Guide*. 2005.
- [20] Mudan. *Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment*. Fire Safety Journal nº12, p.89 a 96, 1987.

[21] F. Pasquill. *Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and other Sources*, 2ª ed., D. Van Nostrand Company, Ltd., Londres, 1974.

[22] World's Longest Tunnels (<http://home.no.net/lotsberg/>). Abril 2008.

ANEXO A – OS MAIORES TÚNEIS DO MUNDO [22]

País	Túnel	Extensão	Data de abertura
Norway	Laerdal	24 510 m	27.11.2000
China	Zhongnanshan (2 tubes)	18 040 m	20.01.2007
Switzerland	St. Gotthard / San Gottardo 2nd Röhre	16 918 m	05.09.1980 ^a
Austria	Arlberg	13 972 m	01.12.1978
Taiwan	Hsuehshan (twin tunnel + service)	12 942 m	16.06.2006
France - Italy	Fréjus	12 895 m	12.07.1980
France - Italy	Mont-Blanc / Monte Bianco	11 611 m	19.07.1965 ^a ^b ^c
Norway	Gudvanga	11 428 m	17.12.1991
Norway	Folgefonn	11 150 m	15.06.2001
Japan	Kan-etsu (south bound tube)	11 055 m	1991,00
Japan	Kan-etsu (north bound tube)	10 926 m	1985,00
Japan	Hida (+emergency tunnel)	10 750 m	2010****
Italy	Gran Sasso d'Italia (East direction)	10 176 m	01.12.1984
Italy	Gran Sasso d'Italia (West direction)	10 173 m	1995,00
Austria	Plabutsch (West tube)	10 085 m	17.12.2004
France	Le tunnel Est (Rueil - Malmaison à Versailles)	10 000 m	2004 - 2006
Austria	Plabutsch (east tube)	9 919 m	27.06.1987
Japan	Tokyo Aqua	9 583 m	18.12.1997
Switzerland	Seelisberg	9 292 m	12.12.1980
India	Rohtang	8 900 m	2013
Italy	Variante di valico	8 703 m	2010
China	Sichuan - Tibet	8 660 m	2000
Singapore	KPE	8 660 m	2007
Japan	Enasan	8 646 m	1985
France - Spain	Somport	8 608 m	17.01.2003
Portugal	Serra da Edtrela	8 600 m	
Norway	Korgfjellet	8 568 m	16.09.2005
Austria	Gleinalm	8 320 m	11.08.1978
China	Bulongqing (in Yunnan province)	8 100 m	2003
Norway	Steigen	8 079 m	1990
Austria - Slovenia	Karawanken	8 019 m	01.06.1991
Italy	Sant' Antonio Morignone	7 960 m	18.02.2000
Norway	Bømlafjord	7 931 m	28.12.2000
Germany	Rennsteig	7 916 m	32.003
China	Jiaozhou Bay	7 800 m	2010
Norway	Eiksund	7 765 m	23.02.2008
Norway	Svartisen	7 615 m	1987
Norway	Høyanger	7 543 m	25.05.1982

Norway	Vallavik	7 510 m	27.04.1985
Slovakia	Višnové	7 480 m	2010
Norway	Åkrafjord	7 400 m	05.07.2000
Norway	Oslofjord	7 390 m	29.06.2000
Japan	Shinkobe	7 175 m	1988
Austria	Landeck	6 955 m	24.06.2000
Iceland	Héðinsfjarðargöng-I	6 910 m	2010
Norway	Nordkapp	6 875 m	15.06.1999
France	Maurice Lemaire	6 872 m	1976
Norway	Frudal	6 758 m	29.10.1995
Austria	Pfänder	6 718 m	10.12.1980
Japan	Karisaka	6 625 m	1998
Norway	Fodnes	6 604 m	29.09.1995
Nederland	Westerschelde	6 600 m	14.03.2003
Switzerland	San Bernardino	6 596 m	01.12.1967
Norway	Innfjord	6 594 m	1991
Austria	Tauern	6 401 m	21.06.1975
South Korea	Chang Su	6 400 m	
Norway	Fjærland	6 397 m	31.05.1986
Norway	Sørdals	6 370 m	01.12.2007
Japan	Higo	6 340 m	1989
Colombia	Tunnel 1	6 330 m	
Iran	Alborz	6 300 m	
Japan	Kakuto	6 255 m	1995
Vietnam	Haûi Vaân Pass	6 247 m	05.06.2005
Italy	Pretunnel Grand St. Bernard South	6 150 m	
Faeroe Islands	Nordoyatunnilin	6 100 m	29.04.2006
Norway	Naustdal	5 970 m	18.08.1995
Norway	Øksendal	5 965 m	28.10.2000
Norway	Atlanterhav (Averøy)	5 955 m	2008
China	Xiang'an	5 950 m	
Italy	Guinza	5 937 m	2006
Japan	Hakamagoshi	5 932 m	2000
Austria	Katschberg	5 898 m	21.06.1975
Iceland	Fáskrúðsfjarðargöng	5 894 m	09.09.2005
Norway	Byfjord	5 875 m	1992
Norway	Tosen	5 857 m	1986
Italy - Switzerland	Grand St. Bernard	5 854 m	19.03.1964
Austria	Strengen	5 851 m	16.12.2005
Switzerland	Pretunnel Grand St. Bernard Nord	5 850 m	
Croatia	Mala Kapela	5 780 m	15.06.2005
Iceland	Hvalfjarðargöng	5 770 m	11.07.1998
Switzerland	Kerenzer	5 760 m	09.04.1986
Norway	Haukeli	5 682 m	91.968
Croatia	Sveti Rok	5 682 m	30.06.2003
Norway	Hitra	5 645 m	08.12.1994
Japan	Hanna	5 578 m	1997
Denmark	Kallsoyar	5 526 m	1985

Switzerland	Mappo - Morettina	5 518 m	13.06.1996
Austria	Bosruck	5 500 m	21.10.1983
Japan	Kanpuzan	5 432 m	1999
Serbia - Montenegro	Sozina	5 400 m	
Colombia	Tunnel 11	5 370 m	
Norway	Frøya	5 305 m	23.06.2000
Austria	Felbertauern	5 304 m	1967
China	Dafengyakou (in Yuannan province)	5 300 m	2003
Norway	Heggur	5 277 m	1984
Italy	Cels	5 245 m	08.12.1992
Switzerland	Sachseln	5 191 m	24.09.1997
Spain	Alfonso XIII (Vielha) Photo	5 240 m	1948
Spain	Juan Carlos I (New Vielha)	5 230 m	2005
Austria	Scmitten	5 111 m	27.06.1996
China	Yuanjiang (in Yunnan province)	5 100 m	200?
Austria	Roppen	5 095 m	06.07.1990
Norway	Freifjord	5 086 m	1992
Croatia	Ucka	5 062 m	1981
Norway	Flenja	5 053 m	1986
Spain	del Cadì	5 026 m	29.10.1984
Tajikistan	Anzob	5 000 m	26.07.2006
Italy	Pozzano	5 000 m	2006

ANEXO B – FACTORES CONDICIONANTES DA SEGURANÇA NUM TÚNEL [8]

Extensão do túnel	Geometria do perfil transversal tipo	Tempo de acesso dos serviços de emergência
Número de galerias	Alinhamento e perfil longitudinal	Características das rodovias de acesso ao túnel
Número de faixas de rodagem na galeria	TMDA e respectivas distribuições diárias e sazonais	Número e largura das vias por faixa de rodagem
Ambiente geográfico e condições meteorológicas prevalentes nas imediações das entradas do túnel	Percentagem de veículos pesados de mercadorias e de veículos pesados de mercadorias perigosas no TMDA	Proibição da circulação de certos veículos, como veículos pesados de mercadorias ou veículos pesados de mercadorias perigosas, segundo o Artigo 10º do Código da Estrada
Risco de congestionamento (diário ou sazonal)	Tipo de construção	Considerações relacionadas com a velocidade de circulação

ANEXO C – RÓTULOS DE MATÉRIAS PERIGOSAS (DESTINADOS AO TRANSPORTE)

Transport "Pictograms"		
		
Flammable Liquid Flammable Gas Flammable Aerosol	Flammable solid Self- Reactive Substances	Pyrophorics (Spontaneously Combustible) Self-Heating Substances
		
Substances, which in contact with water, emit flammable gases (Dangerous When Wet)	Oxidizing Gases Oxidizing Liquids Oxidizing Solids	Explosive Divisions 1.1, 1.2, 1.3
		
Explosive Division 1.4	Explosive Division 1.5	Explosive Division 1.6
		
Compressed Gases	Acute Toxicity (Poison): Oral, Dermal, Inhalation	Corrosive
		
Marine Pollutant	Organic Peroxides	

ANEXO D – MODELO TUNPRIM [5]

1. Type of risk assessment method	Probabilistic risk assessment
2. Objective	A conceptual framework supporting the decision making process by providing a common language for all parties involved. The objective is to have a basis to establish safety objectives and criteria for underground infrastructure. The TunPrim model is designed to calculate the internal safety in two-bore tunnels with uni-directional traffic in each bore during normal operation.
3. Type of accidents	• Traffic disturbance without damage • Collisions • Fire • Explosion • Leakage of aggressive and toxic materials
4. Methodology	
4.1. Structure	• Identification of initial events • Identification of accident scenarios in an event tree, each branch of the event tree is a scenario • Frequency calculation for each scenario • Consequence assessment for each scenario • Calculation of the overall risk
4.2. Hazard Identification	A set of hazards is available in TunPrim, which was obtained by hazard identification. The basis for the hazard identification is the integrated tunnel safety philosophy of the Centre for Tunnel Safety in the Netherlands. Specifically the stages of an accident are used (see also Appendix and SafeT D1-report).
4.3. Frequency calculation	Event tree analysis
4.4. Consequence assessment	Consequences for each branch of the event tree are calculated as the number of fatalities. Three categories of fatalities: “mechanical” victims, deaths due to very serious injuries or entrapment (unable to escape), death due to fires, explosions and/or exposure to toxic substances. Evacuation possibilities: • Free fleeing distance • Traffic jam
4.5. Risk calculation	The risk is presented as the Expected Value (EV, the average number of deaths per year) and Societal Risk (F/N-curves, a graph of the cumulative frequency of the occurrence of N or more deaths).
5. Risk monitoring & evaluation	
5.1. Risk-informed decision making	
5.2. Risk acceptability criteria	For probabilistic QRA, risk acceptance criteria have been defined for tunnel users: an individual risk of $1,0 \cdot 10^{-8}$ and a societal risk of $1,0 \cdot 10^{-1}/(F \cdot N)$ have been defined. However, these are test values which at the moment do not have a legal status in the Netherlands.

ANEXO E – MODELO UNIVERSIDADE DE LUND (SUÉCIA) [5]

1. Type of risk assessment method	Quantitative risk analysis for a unidirectional road tunnel
2. Objective	Using the described methodology gives the decision makers a good idea of the risk level in the tunnel. The results can suitably be used by decision-makers when deciding which resources should be spent on further safety installations for the tunnel.
3. Type of accidents	Types of accidents included are • Fire • Explosion Fire accidents for cars and fire and explosion accidents for transport of flammable and explosive hazardous goods (gasoline, propane, and TNT) are included.
4. Methodology	
4.1. Structure	The methodology consists of the following steps: • Definition of the tunnel • Identification of representative accident scenarios • Frequency determination • Consequence assessment, including a basic queue model and evacuation analysis • Risk mapping and interpretation • Risk reduction, ranking system for risk reducing measures • Tunnel Safety Management System
4.2. Hazard Identification	Several hazard identification methods are possible: • a simple procedure based on a literature study on information from tunnel fires and how they initiated and developed • more complicated methods such as Hazard and operability (HAZOP) analysis and What-if Analysis
4.3. Frequency calculation	The frequency per year of each scenario is determined. The procedure is based on the Swedish VTI model. A simple event tree is constructed including scenario's and frequencies Data sources of statistical information are: • PIARC 1999 [11], initial frequencies for scenarios involving passenger car and HGV fires • Information available for highways in Germany are used to determine the initial frequencies for each scenario involving hazardous goods[12]. • Germany, Ernst Basler, 2001 [13] • Sweden, Räddningsverket, 1996 [15]
4.4. Consequence assessment	Consequences resulting from a flash fire, vapour cloud explosion, and a BLEVE, pressure wave resulting from a TNT explosion. • consequences of fire on humans by ◦ Heat and direct radiant heat ◦ Concentrations of carbon monoxide, carbon dioxide, and low concentrations of oxygen • Evacuation possibilities from a tunnel ◦ Evacuation time: awareness time, reaction time and movement time ◦ Simple queue model
4.5. Risk calculation	The frequency for each scenario is calculated as well as the consequence measured in number of casualties. The final societal risk is displayed in an F/N Curve.
5. Risk monitoring & evaluation	
5.1. Risk-informed decision making	
5.2. Risk acceptability criteria	The subject of risk acceptability criteria is discussed. Dutch and Swiss Risk criteria are shown as an example
6. Risk reduction	Possible approaches for risk reduction: • Reduce the evacuation time • Prolong the time until hazardous conditions occur • Reduce the probability of an accident occurring Furthermore the importance of a Tunnel Safety Management system is stressed and examples are given

ANEXO F – MODELO TUSI (NORUEGA) [5]

1. Type of risk assessment method	Frequency assessment method, based on statistics
2. Objective	To calculate the number of traffic incidents, accidents, and fires in new and existing road tunnels
3. Type of accidents	Types of accidents included: Personal injury accidents, material damage only accidents, fires in private cars and HGV and incidents (cases where a vehicle has stopped involuntary inside a tunnel).
4. Methodology	
4.1. Structure	TUSI is a frequency assessment method
4.2. Hazard Identification	N.A.
4.3. Frequency calculation	This is the essence of the method. The following variables are taken into account in the model: • Accident rate on equal road section i.e. sections with equal or similar geometry covering the tunnel itself and 50 m in front of the tunnels; • Speed limit • One or two way traffic • AADT (average Annual Daily Traffic) • HGV (% of AADT) • Length of the tunnel • Number of lanes in each direction • Geometry (both horizontal and vertical)
4.4. Consequence assessment	N.A.
4.5. Risk calculation	N.A.
5. Risk monitoring & evaluation	Accident rate, number of accidents, number of car fires (private cars and HGV) as well as incidents are calculated.
5.1. Risk-informed decision making	N:A
5.2. Risk acceptability criteria	N:A technical risk acceptance criteria are not used in Norway

ANEXO G – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS ESTUDADOS) [18]

name	units	1 air/smoke	2 gasoline	3 propane	4 chlorine	5 ammonia	6 acrolein	7 CO2
molecular weight	kg/kmol	28.96	115.00	44.10	70.91	17.03	56.06	44.01
boiling point	K	80.0	333.0	230.9	239.1	239.7	325.8	194.7
gas density (at 1 atm)	kg/m3	1.22	4.86	1.86	3.00	0.72	2.37	1.85
specific heat gas	J/kg.K	1005.0	1039.0	1612.0	459.0	2110.0	1198.0	858.0
vapour pressure	Pa	338300.0	42780.0	730900.0	589000.0	727700.0	24000.0	5727000.0
heat of vaporisation	J/kg	0.0	370000.0	348000.0	256400.0	1209000.0	547600.0	25000.0
liquid density	kg/m3	306.4	740.4	580.0	1427.4	616.6	844.0	738.5
specific heat liquid	J/kg.K	2860.0	2194.4	2591.0	926.7	4591.0	2151.0	2260.0
heat of combustion	MJ/kg	0.0	45.0	46.0	0.0	18.6	27.7	0.0
lower explosive limit	%	0.0	1.4	2.1	0.0	16.0	2.8	0.0
upper explosive limit	%	0.0	7.4	9.5	0.0	25.0	31.0	0.0
laminar burning velocity	m/s	0.00	0.40	0.52	0.00	0.00	0.40	0.00
burning rate	kg/s/m^2	0.000	0.055	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000

ANEXO H – PARÂMETROS DO MODELO DE CÁLCULO DO TEMPO DE EVACUAÇÃO [18]

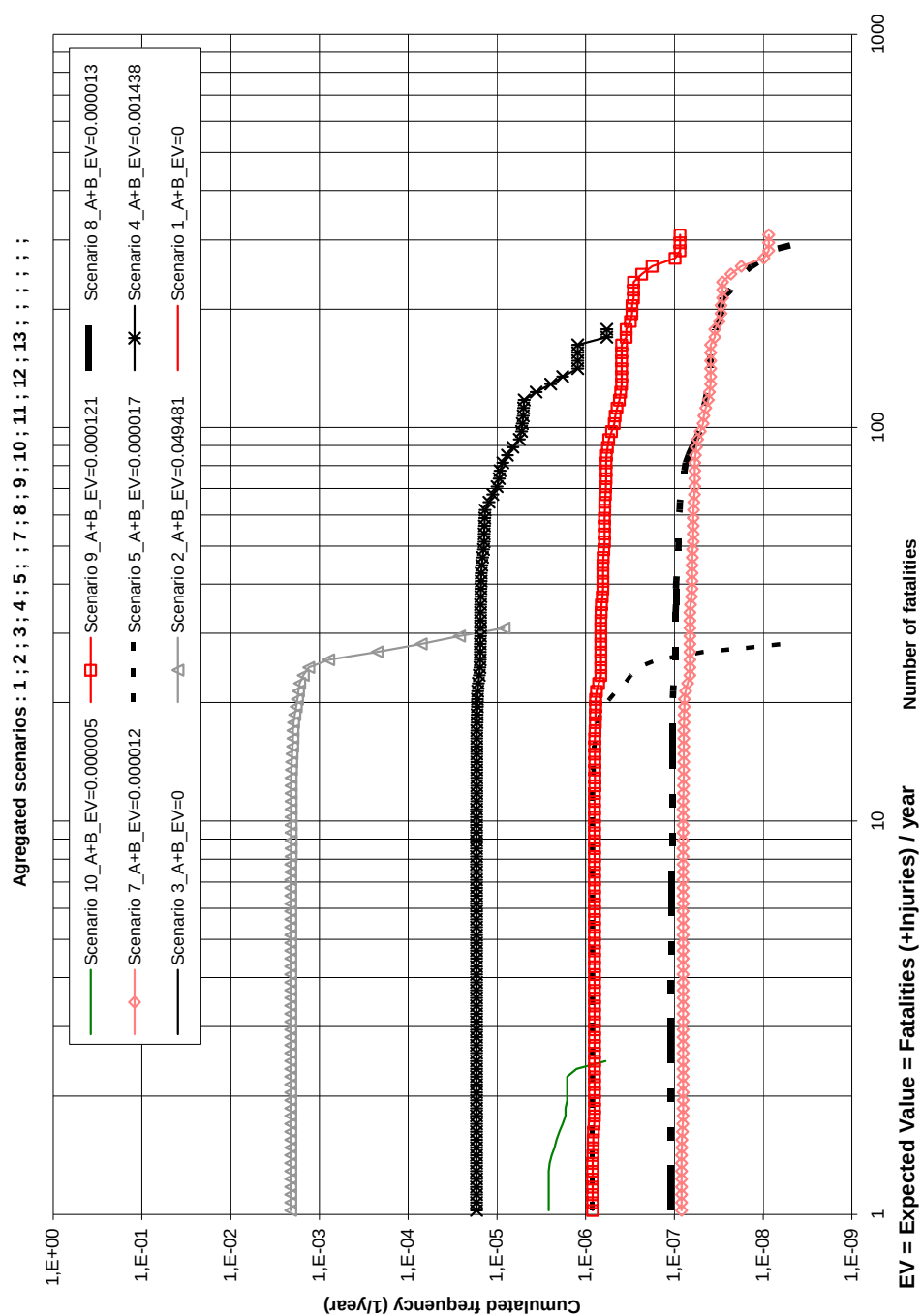
	Earsception time (sec)															Response time				
	Occupant characteristics					Wayfinding					Hazard identification					(sec)				
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M								
Proportion of distance from incident to safety	Alertness	Mobility	Social affiliation	Commitment	Familiarity	Distance from incident	Traffic density	Tunnel gradient	Tunnel curvature	Perceived severity of situation	Vehicle travel speed	Vehicle type	Sum B-M	Avg B-M	Woff = S/Avg	w0	w1	w2	w3	
1.0	4	4	3	3	2	1	1	5	5	4	3	2	37	3.1	1.6	486	292	195	97	
0.8	4	4	3	3	2	2	2	5	5	4	3	2	39	3.3	1.5	462	277	185	92	
0.6	4	4	3	3	2	3	3	5	5	4	3	2	41	3.4	1.5	439	263	176	88	
0.4	4	4	3	3	2	4	4	5	5	4	3	2	43	3.6	1.4	419	251	167	84	
0.2	4	4	3	3	2	5	5	5	5	4	3	2	45	3.8	1.3	400	240	160	80	

ANEXO I – CARACTERÍSTICAS DA SECÇÃO 1 DA DIRECÇÃO A

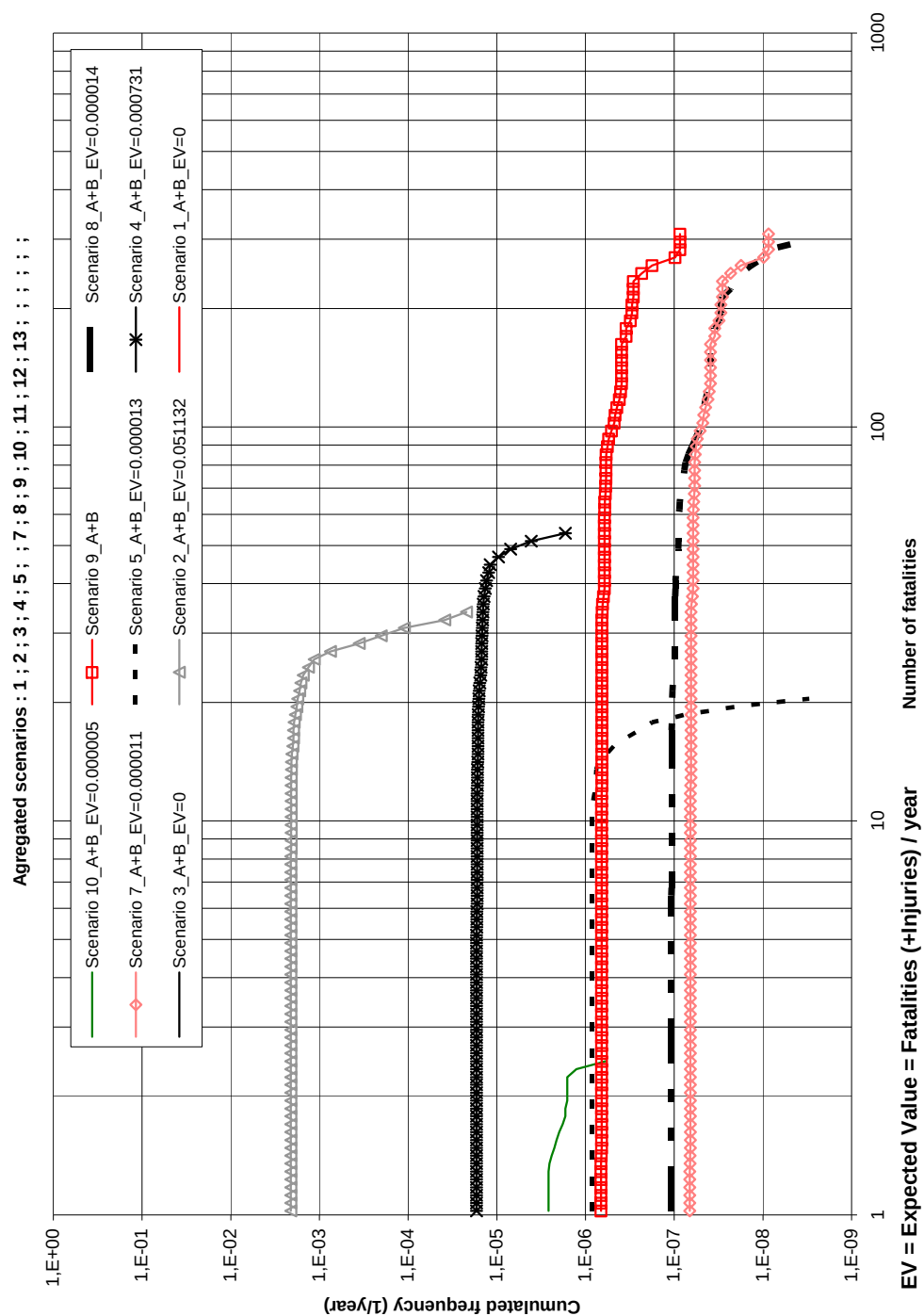
Tunnel 1 inputs	symbol	units	data
cross-section geometry			
effective width	W	m	17,51
effective height	H	m	12,12
open cross-sectional area	A	m ²	212,2212
camber	Cam	%	2,5
lengthwise geometry			
...segments (homogeneous - ventilation, gradient)			
total number of segments	Ns	-	1
segment number		-	1
segment lengths	Xs	m	200
total length of tunnel	Xt	m	200
segment gradient	Gs	%	-1,85
...nodes (segment start and end points)			
total number of nodes	Nn	-	2
node number		-	1
location of node	Xn	m	0
ventilation - normal			
...segments			
segment number		-	1
volume flow rate extracted from tunnel	VsN	m ³ /s	0
...nodes (segment start and end points)			
node number		-	1
volume flow rate along tunnel at nodes	VnN	m ³ /s	0
ventilation - emergency			
number of emergency ventilation regimes	nE	-	1
time taken to activate emergency ventilation	tE	mins	6
segment number		-	1
emergency ventilation regime if accident within this segment	iE	-	1
...volume flow rate extracted from tunnel			
	VsE	m ³ /s	

drainage			
open area of discrete drains or continuous slot (per Xd m)	Ad	m ²	0,05
interval between drains, or slot length used to define Ad	Xd	m	1
traffic			
traffic direction (0=bi-directional, 1=A-to-B, -1=B-to-A)	TrDir	-	1
traffic density (0=none, 1=light, 2=normal, 3=peak)	TrDen	-	0,859407043
mitigation measures			
average spacing between emergency exits	Xe	m	200
emergency coms (0=no, 1=bell/siren, 2=PA, 3=PA+CCTV)	Ecom	-	3
tunnel structure			
type of construction (1=drill+blast/tbm, 2=cut+cover)	itype	-	2
ground type (1=bedrock, 2=fragmented, 3=frag/under water)	ground	-	2
internal radius	trad	m	0
lining thickness	dlin	m	0
road support thickness	droad	m	1
mid-wall thickness	dmidw	m	1
overburden depth	dover	m	7
depth of water above solid overburden	dwater	m	0
fire protection lining (0=no, 1=yes)	fprot	-	1
temperature rating	fptemp	degC	1200
time rating	fptime	mins	240
State of data entries:			
calculations			Ended
...sub-segments			
maximum sub-segment length		m	10
segment number		-	1
number of sub-segments per segment	Nsub	-	20
total number of sub-segments		-	20
actual sub-segment lengths	Xsub	m	10

ANEXO J – CURVA F-N COM TODOS OS CENÁRIOS PARA O CASO 1



ANEXO K – CURVA F-N COM TODOS OS CENÁRIOS PARA O CASO 2



ANEXO L – CURVA F-N COM TODOS OS CENÁRIOS PARA O CASO 3

