



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES
Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança

Proc. 0703/11/16184

ANÁLISE DE RISCO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS

O Modelo DG-QRAM

Elaborado no âmbito do Plano de Investigação
Programada do LNEC para 2005-2008

PIP 2005-2008

Tema - Risco e Segurança

Lisboa • Julho de 2007

I&D TRANSPORTES

RELATÓRIO 210/2007 – NPTS

SUMÁRIO

O presente relatório tem como objectivo descrever o estado da prática actual no que se refere à análise de risco em túneis rodoviários, designadamente no contexto europeu. Pretendeu-se igualmente apresentar o software de avaliação de riscos no transporte de mercadorias perigosas DG-QRAM (*Dangerous Goods - Quantitative Risk Assessment Model*), desenvolvido pela Comissão Técnica C3.3 do PIARC (*World Road Association*) em conjunto com a OCDE (*Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico*), e avaliar a viabilidade da sua aplicação em Portugal.

É apresentado o contexto legal e analisado o enquadramento técnico-científico em que se inserem as análises de risco, designadamente em túneis rodoviários. Descreve-se pormenorizadamente o programa DG-QRAM, o respectivo funcionamento – incluindo dados de entrada, principais variáveis de cálculo e resultados produzidos –, potencialidades e campos de aplicação.

Identificam-se ainda os passos mais relevantes para desenvolvimento do conhecimento na área da análise de risco em infra-estruturas de transporte, particularmente no que diz respeito à aplicação do DG-QRAM em túneis portugueses.

TUNNEL RISK ANALYSIS – DG-QRAM MODEL

ABSTRACT

This report aims to analyse the current practices in risk analysis of road tunnels especially in the European context. The European legal framework, the main concepts involved and current technical and scientific approaches to risk analysis are presented, having in mind the assessment of road tunnel safety.

In addition, this study describes in detail the DG-QRAM (*Dangerous Goods - Quantitative Risk Assessment Model*) software, developed jointly by the PIARC (*World Road Association*) Technical Commission C3.3 and OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*). This application allows an evaluation of risks of dangerous goods transport through road tunnels. An overview of the functioning, input and output data, methodologies used and current applications of the software is carried out, taking into consideration its potential adjustment to Portuguese reality.

The main procedures required for the improvement of know-how in risk analysis of transport infrastructures are identified, especially for the application of DG-QRAM on Portuguese road tunnels.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO – DIRECTIVA 2004/54/CE	1
2	ANÁLISE DE RISCO – CONCEITO GERAL	5
3	ANÁLISE DE RISCO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS.....	9
	3.1 Conceito	9
	3.2 Métodos Utilizados.....	12
	3.3 Exemplo de aplicação (Holanda)	16
4	O PROGRAMA DG-QRAM	18
	4.1 Conceito	18
	4.2 Funcionamento.....	23
	4.3 Exemplo de aplicação (Áustria)	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E VIAS DE PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS.....	33
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 Fases de um acidente rodoviário.....	9
Quadro 2 Síntese dos métodos utilizados.	15
Quadro 3 Cenários de acidente considerados no DG-QRAM.....	19
Quadro 4 Dados de entrada do DG-QRAM.....	25
Quadro 5 Dados de tráfego – <i>Tauern</i>	28
Quadro 6 Distribuição dos vários tipos de VPMP – <i>Tauern</i>	29
Quadro 7 Valor esperado (EV) em mortos / ano – <i>Tauern</i>	31

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquematização das análises de risco em túneis rodoviários – PRA / QRA ...	11
Figura 3.2 Localização do Coentunnel e relação entre velocidades de VP e taxa de acidente	17
Figura.4.1 Função Probit.....	20
Figura 4.2 Esquematização de um acidente a céu aberto no DG-QRAM.....	22
Figura 4.3 Exemplo de Curva F/N	23
Figura.4.4 Estrutura do DG-QRAM.....	24
Figura.4.5 Iniciação do DG-QRAM.....	25
Figura.4.6 Segmentação do sistema de ventilação normal - <i>Tauern</i>	29
Figura.4.7 Modelação dos fluxos da ventilação normal – <i>Tauern</i>	29
Figura.4.8 Modelação dos fluxos da ventilação de emergência original – <i>Tauern</i>	30
Figura.4.9 Modelação dos fluxos da nova ventilação de emergência – <i>Tauern</i>	30
Figura.4.10 Gráfico F/N – <i>Tauern</i>	31

1 | INTRODUÇÃO – DIRECTIVA 2004/54/CE

Os túneis rodoviários podem ser considerados como singularidades ao longo de uma via de comunicação, uma vez que apresentam características específicas que alteram as condições de tráfego, o comportamento de condução e os níveis de segurança.

Os incêndios ocorridos nos túneis dos Alpes da Rede Rodoviária Transeuropeia (RRT) em 1999 (Túnel do Monte Branco, em França e Itália; Túnel de *Tauern*, na Áustria) e em 2001 (Túnel de São Gotardo, na Suíça) vieram evidenciar que vários cenários de acidente em túneis rodoviários devem ser devidamente estudados, para elaboração de procedimentos de segurança adequados. Acidentes desta natureza podem ter consequências dramáticas (Monte Branco – 39 mortos; *Tauern* – 20 mortos e 50 feridos; São Gotardo – 11 mortos) e revelar-se extremamente prejudiciais em termos de vidas humanas, de congestionamento, de emissões de poluentes e de danos materiais na própria infra-estrutura e sua envolvente. Várias medidas de intervenção, requisitos e métodos de estudo foram, e continuam a ser, desenvolvidos com o objectivo principal de tornar os túneis mais seguros.

A Comissão Europeia, pressionada pela gravidade e pelo pequeno intervalo de tempo entre estes acidentes, anunciou no “Livro Branco sobre a política europeia de transportes” (Comissão da União Europeia (UE), 2001), a necessidade de definir exigências mínimas de segurança aplicáveis aos túneis da RRT. Na sequência, tomando como base as recomendações formuladas pela UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) e PIARC (*World Road Association*), e com o intuito de harmonizar as legislações nacionais de vários estados membros, o Parlamento e o Conselho Europeu aprovaram em Abril de 2004 a Directiva 2004/54/CE relativa aos requisitos mínimos de segurança para os túneis da RRT. Esta Directiva fixa um conjunto de normas mínimas de segurança aplicáveis não só a aspectos organizativos, mas também aos estruturais, técnicos e operacionais, relativamente a todos os túneis com mais de 500 m de comprimento. Em 2002 foram identificados 515 túneis com mais de 500 m na RRT, dos quais unicamente um se situa em Portugal.

Esta Directiva foi transposta para a ordem jurídica nacional através da publicação do Decreto-Lei (DL) nº 75/2006 de 27 de Março 2006, no qual o regime de requisitos mínimos de segurança foi alargado a todos os túneis da Rede Rodoviária Nacional. De acordo com este DL e com a referida Directiva europeia, são identificados, em termos organizacionais, quatro tipos de entidades com responsabilidade e intervenção na segurança dos túneis:

- Autoridade Administrativa (EP – Estradas de Portugal, E.P.E.) – responsável por garantir o respeito por todos os aspectos de segurança de um túnel e colocar em serviço os túneis nos termos previstos no DL nº 75/2006.
- Entidade Gestora do túnel – responsável pela gestão de um determinado túnel na fase em que este se encontra (projecto, construção ou serviço) e identificada pela Autoridade Administrativa. Qualquer incidente ou acidente significativo ocorrido num túnel deve ser objecto de um relatório elaborado pela Entidade Gestora, a entregar no prazo de 22 dias ao Agente de Segurança, à Autoridade Administrativa e aos serviços de segurança relevantes (designadamente serviços de protecção civil, forças policiais, bombeiros ou serviços de saúde de emergência).
- Agente de Segurança – entidade que coordena todas as medidas preventivas que visem garantir a segurança dos utentes e do pessoal afecto à exploração do túnel, nomeada pela Entidade Gestora do túnel.
- Entidade Inspectoria – entidade que efectua inspecções, avaliações ou ensaios, funcionalmente independente da Entidade Gestora do túnel. A Autoridade Administrativa pode desempenhar a função de Entidade Inspectoria.

As responsabilidades, poderes e funções de cada uma destas entidades encontram-se definidas pormenorizadamente na Directiva 2004/54/CE e no DL nº75/2006. Para além destas entidades, salienta-se a referência a organismos funcionalmente independentes da Entidade Gestora, responsáveis, quando solicitados, pela realização de análises de risco de um determinado túnel.

As análises de risco são especificadas no Artigo 13º da Directiva:

“1. As análises de risco, se necessárias, devem ser efectuadas por um organismo funcionalmente independente do gestor do túnel. O conteúdo e os resultados das análises de risco devem ser incluídos na documentação de segurança apresentada à autoridade administrativa. A análise de risco é uma análise dos riscos apresentados por um determinado túnel, tendo em conta todos os factores de concepção e as condições de circulação que afectam a segurança, nomeadamente as características do tráfego, a extensão do túnel, o tipo de tráfego, e a geometria do túnel, bem como o número de veículos pesados de mercadorias por dia.

2. Os Estados-Membros devem garantir a utilização, ao nível nacional, de uma metodologia detalhada e bem definida, que corresponda às melhores práticas disponíveis, e devem informar a Comissão da metodologia aplicada; esta última

porá essas informações à disposição dos restantes Estados-Membros, em formato electrónico.

3. Até 30 de Abril 2009, a Comissão deve publicar um relatório sobre as práticas seguidas nos Estados-Membros, podendo, se necessário, apresentar propostas para adopção de uma metodologia comum harmonizada para análises de risco, nos termos do artigo nº 2 do artigo 17º.”

As análises de risco são obrigatórias sempre que os requisitos mínimos, especificados nos Anexos I e III da Directiva, não estejam assegurados, permitindo, assim, que se possa recorrer a soluções inovadoras e diferentes, na condição de salvaguarda de condições de segurança iguais ou superiores às referências estipuladas (Artigo 3.º, Directiva 2004/54/CE).

As análises de risco constituem também documentação obrigatória na fase de projecto, conforme referido no Anexo II da Directiva. Assim, todos os túneis com projecto sujeito a aprovação após 20 de Abril de 2006 devem conter na respectiva documentação de segurança, uma *“análise específica dos riscos, descrevendo eventuais acidentes que possam ocorrer durante a fase de funcionamento e que possam claramente afectar a segurança dos utentes do túnel”* (2.3 Anexo II, Directiva 2004/54/CE).

Relativamente aos túneis com projectos aprovados mas não abertos à circulação ou túneis já em serviço, deve ser analisada a sua conformidade com os requisitos especificados na Directiva. Caso estes requisitos não sejam verificados, deve proceder-se às alterações ou adaptações necessárias tendo em vista o cumprimento dos níveis de segurança exigidos, conforme concluído mediante análises de risco.

No Anexo I da Directiva são ainda enunciados os principais factores que condicionam os níveis de segurança nos túneis:

- Extensão do túnel;
- Número de galerias;
- Número de faixas de rodagem na galeria;
- Número de sentidos por faixa de rodagem;
- Geometria do perfil transversal tipo;
- Alinhamento e perfil longitudinal;
- Tipo de construção;
- Tráfego médio diário anual (TMDA) e respectivas distribuições diárias e sazonais;

- Risco de congestionamento (diário ou sazonal);
- Tempo de acesso dos serviços de emergência;
- Proibição da circulação de certos veículos, como veículos pesados (VP) de mercadorias ou veículos pesados de mercadorias perigosas (VPMP), segundo o Artigo 10º do Código da Estrada;
- Percentagem de VP e de VPMP no TMDA;
- Características das rodovias de acesso ao túnel;
- Largura das vias;
- Considerações relacionadas com a velocidade de circulação;
- Ambiente geográfico e condições meteorológicas prevaletentes nas imediações das entradas do túnel.

Sempre que um túnel apresente uma característica específica nalgum destes factores deve ser feita uma análise de risco de acordo com o Artigo 13º. Estes factores podem ser agrupados em quatro categorias distintas: infra-estrutura, operação, utentes e veículos. É precisamente no âmbito das três primeiras categorias que se inserem os requisitos mínimos estipulados nos Anexos I e III da Directiva.

Com a Directiva pretendeu-se melhorar as condições de protecção dos utilizadores, do túnel e do meio em que este se insere. A ausência de qualquer acção neste sentido é potencialmente danosa, tendo em conta os registos históricos de acidentes e respectivas consequências em túneis rodoviários da RRT.

2 | ANÁLISE DE RISCO – CONCEITO GERAL

O presente trabalho insere-se no âmbito alargado da segurança rodoviária, que tem como objectivo principal o estudo do acidente rodoviário e respectivas consequências. A fim de permitir uma melhor compreensão dos vários conceitos e pressupostos presentes neste trabalho, julga-se importante a apresentação de conceitos básicos associados à segurança rodoviária, directa ou indirectamente relacionados com as análises de risco.

Os acidentes rodoviários encontram-se associados a um conceito alargado de perigo. Entende-se como **perigo** o conjunto de condições potenciais que, quando activado, se transforma numa série de acontecimentos que culmina em perda (Cardoso, 2007). Esta perda, que é uma característica do acidente à qual está frequentemente associada a noção de **dano**, pode ser traduzida em morte, ferimentos, perda de equipamento ou, ainda, em perda ambiental. Existem várias definições do conceito de **acidente rodoviário** (Macedo, 2000), estando todas elas associadas ao mecanismo dinâmico que resulta da activação do perigo, produzindo dano. Finalmente define-se como **risco** uma medida do perigo de acidente em que uma pessoa incorre ao percorrer determinado trajecto rodoviário (Macedo, 2000). Na engenharia, o risco é considerado como sendo o produto entre a probabilidade de ocorrência de um acidente e os respectivos danos provocados (Hadden, 1984). Importa, no entanto, referir que em publicações sobre segurança rodoviária é corrente a associação do risco à probabilidade do evento ou do dano corporal.

A **análise de risco** consiste genericamente no estudo, compreensão e avaliação dos impactos negativos e indesejados de intervenções, medidas, métodos ou materiais relativamente à vida humana, saúde, propriedade, meio económico ou ambiente (Crockford, 1986). Estas análises surgem com a impossibilidade de proteger um determinado sistema ou projecto de todos os perigos possíveis, tendo em conta a limitação natural dos recursos disponíveis. Quando aplicado à engenharia, este método permite ainda a combinação de vários cenários e respectivos impactos tendo em conta os métodos probabilísticos normalmente utilizados (ver Capítulo 3). Utilizado cada vez mais em processos de decisão e na comparação de alternativas, este método é constituído, segundo a SRA (*Society for Risk Analysis*), por três componentes distintas: a **avaliação de riscos**, a **gestão de riscos** e a **comunicação de riscos**.

A **avaliação de riscos** visa analisar eventuais situações ou cenários que possam provocar danos de natureza diversa, avaliando a sua probabilidade de ocorrência e estimando os

respectivos danos (Kates e Kasperson, 1984). Esta componente constitui o principal passo na análise de riscos, sendo também a tarefa mais susceptível a erros de estimação. Efectivamente, a incerteza quer na definição de cenários de acidentes a considerar quer na estimação, tanto das respectivas probabilidades de ocorrência como dos efeitos a eles associados, pode ser considerável. Tendo em conta que neste tipo de análises é frequente a limitação de conhecimentos e de recursos económicos e de tempo disponível para os obter, bem como a multiplicidade de especialidades a considerar na estimação das consequências, a utilização de uma única unidade de quantificação do risco torna-se difícil mas fundamental. A selecção dos cenários e das consequências a ter em conta na análise é, por vezes, excluída da avaliação de riscos. Como se verá mais à frente (Capítulo 3), no caso de análises de risco aplicadas a túneis rodoviários, a bibliografia encara a selecção de cenários como uma tarefa delicada e condicionante, considerando-a independente da avaliação de riscos.

A **gestão de riscos** consiste no processo de tomada de decisão sobre determinados riscos (Zimmerman, 1986). Pretende-se identificar, no conjunto de riscos considerados na *avaliação de riscos*, aqueles que necessitam de ser controlados, definindo as intervenções necessárias para a sua transferência, minimização ou mitigação. Numa gestão ideal dos riscos é dada prioridade ao risco com maior probabilidade de ocorrência e com as consequências mais gravosas, seguido pelos restantes cenários por ordem decrescente de probabilidade e de gravidade (U.S. Dept. of Defense, 1987). Na prática, este processo pode torna-se muito difícil devido à necessidade de definir pesos associados às várias variantes, com o intuito de comparar cenários menos graves com elevada probabilidade de ocorrência com cenários mais graves mas com fraca probabilidade de acontecerem (Alemi, 2006).

A **comunicação de riscos** consiste na transferência de informação pertinente entre as várias partes interessadas na análise de risco (projectistas, construtores, operadores, entidades reguladoras, utentes, serviços de emergência...). Importa, nesta fase, conhecer a percepção dos vários riscos por parte dos agentes envolvidos e interpretar adequadamente os resultados da análise realizada.

Considerando a definição de análise de risco já enunciada, duas interpretações para o conceito de risco podem ser identificadas (Bradbury, 1989):

- 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;
- Um atributo resultante de uma percepção individual ou social – destacando a

dependência do risco relativamente à percepção e interpretação das pessoas susceptíveis a eventuais danos. Este tipo de interpretação está usualmente associado a estudos psicométricos de aceitação social e a análises comportamentais.

É no âmbito do primeiro conceito que se inserem as análises de risco utilizadas nas ciências tecnológicas e mais propriamente na engenharia. Esta abordagem mais técnica apresenta duas vertentes distintas (Molag, 2006): a **avaliação determinística de riscos** (*Deterministic Risk Assessment* - **DRA**) e a **avaliação probabilística de riscos** (*Probabilistic Risk Assessment* - **PRA**). São estes dois métodos os mais utilizados em análises de risco em túneis rodoviários e que são apresentados em pormenor no Capítulo 3.

Nas DRA são analisados pormenorizadamente os vários acontecimentos e as consequências associadas a um determinado cenário. Constituindo um instrumento fundamental na compreensão dos vários aspectos em jogo em situação de acidente, as DRA são frequentemente usadas na preparação dos serviços de emergência ou no estudo de medidas pontuais de minimização de risco. Nas DRA não são consideradas as probabilidades de ocorrência dos eventos.

Nas PRA os riscos estudados são considerados como sendo o produto entre os danos de vários eventos e as respectivas probabilidades de ocorrência (Hadden, 1984). Os danos são usualmente expressos em frequências de ocorrência (número de mortos ou de feridos) enquanto que as probabilidades de ocorrência podem ser, muitas vezes, estimadas a partir de frequências observadas. As PRA permitem a análise conjunta de vários cenários, associando probabilidades e danos a cada acontecimento. Nestas análises, o nível de pormenor dos efeitos dos acontecimentos é menor do que nas DRA; segundo alguns autores, o mérito de permitirem uma avaliação global do risco compensa o menor rigor na análise de efeitos.

São apontadas algumas dificuldades na utilização da PRA como método de análise de risco. A determinação de probabilidades de eventos raros tem-se revelado uma tarefa difícil. Quando a base de informação não é suficientemente completa, recorre-se aos intervalos de tempo entre os poucos registos a fim de determinar probabilidades de eventos raros. Outro aspecto frequentemente apontado é o facto de uma PRA necessitar de uma selecção prévia de cenários e respectivas consequências, a fim de tornar a análise de risco num processo viável e eficiente. Caso este passo não seja efectuado com o devido cuidado, a análise de risco pode ser irrelevante. Finalmente, o facto de, tanto as DRA como as PRA necessitarem normalmente de registos históricos para a determinação de probabilidades de eventos pode fazer com que futuros cenários nunca observados sejam esquecidos. Cabe ao agente

responsável pela análise de risco estudar os perigos prioritários, sabendo que não é viável prevenir ou proteger-se de todos os cenários possíveis. Sendo a selecção de cenários uma tarefa condicionante no que diz respeito à confiabilidade dos resultados de análise de risco deste tipo (PRA e DRA), vários autores consideram-na separada da avaliação de riscos (Trijssenaar-Buhre *et al*, 2005). Vários métodos de selecção de cenários encontram-se referenciados na bibliografia, indicando-se, no Capítulo 3, os métodos mais utilizados em análises de risco em túneis rodoviários.

As PRA e DRA tiveram origem na indústria aeroespacial e militar. Nos anos 40 as análises de risco foram desenvolvidas no âmbito das tecnologias de mísseis de balística intercontinental. Com o aumento progressivo do alcance deste tipo de mísseis, o estudo dos riscos em testes e ensaios relativamente às populações locais tornou-se imprescindível.

Nos anos 50 as análises de risco passaram também a ser utilizadas na indústria de aviação comercial, mas com um objectivo um pouco diferente: determinar o risco de falha das várias componentes das aeronaves e das tecnologias utilizadas na altura (Birkeland, 2002).

Um dos primeiros estudos probabilísticos, tal como os conhecemos actualmente, realizou-se após o incêndio em solo do voo AS-204 (Apolo 1) em Janeiro de 1967, causando a morte de toda a tripulação. Neste estudo datado de 1969, foi definido pela NASA (*National Aeronautics and Spacial Administration*) o limite de 1% para a probabilidade de perda de vidas humanas em todos os voos do projecto Apolo. Hoje em dia, quase todas as componentes de engenhos espaciais são sujeitas a análises de risco individuais.

Nos anos 70 as análises de risco passaram a ser utilizadas no estudo da segurança de centrais com reactores nucleares. O primeiro, *Reactor Safety Study* (1975), foi realizado pela *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. O acidente de 1979 na central nuclear de *Three Miles Island* nos EUA evidenciou que neste estudo de 1975 já tinham sido considerados correctamente os cenários de falha e de acidente naquela central, realçando a necessidade de realização de análises de risco neste tipo de projectos.

Recentemente as PRA e DRA têm sido adaptadas a outras actividades relacionadas com situações de acidente ou de desastre natural. Cada vez mais as análises de risco são utilizadas para fins diversos, sendo consideradas um elemento de apoio à tomada de decisões ou simples avaliação e comparação de medidas alternativas. Vários exemplos foram já reportados na bibliografia, desde a aplicação na análise de actividade sísmica (Chang *et al*, 2000), em estudos de cheias e projectos hidráulicos (Voortman *et al*, 2002; Mai, Zimmermann, 2003; Kaczmarek, 2003), em análises de poluição e de acidentes ambientais (Slob, Pieters 1998; Moore *et al*. 1999), em sistemas de saúde (Cohen, 2003; Garrick *et al*, 1999) e no desenvolvimento de produtos farmacêuticos (Keefeer, 2001).

3 | ANÁLISE DE RISCO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS

3.1 Conceito

Tendo em conta o que foi referido no Capítulo anterior, torna-se mais fácil explorar o conceito de análise de risco em túneis rodoviários, apesar de nem sempre a abordagem desta análise específica estar em concordância com o quadro conceptual geral apresentado no Capítulo 2.

As condições envolventes, a geometria e estrutura do túnel, os equipamentos e instalações utilizados, as características de tráfego e dos vários agentes envolvidos devem ser considerados ao longo das várias fases de um acidente (ver Quadro 1):

Quadro 1 | Fases de um acidente rodoviário (adaptado de Macedo, 2000 e Trijssenaar-Buhre et al, 2005)

Pré-colisão	Alteração/desvio da situação normal de circulação
Colisão	Momento do acidente
	Desenvolvimento do acidente
	Ocorrência de eventuais situações relativamente a outros utentes
Pós-colisão	Deteção, verificação e comunicação do acidente
	Refúgio / fuga por parte dos utentes do túnel
	Chegada das autoridades e serviços de emergência
	Mitigação das consequências e danos do acidente pelas autoridades e serviços de emergência

Como já foi referido no Capítulo 2, antes de proceder à avaliação do risco importa definir quais os cenários e acontecimentos a considerar nas várias fases de acidente. No que diz respeito a acidentes em túneis rodoviários, existem vários métodos frequentemente utilizados na identificação de cenários possíveis e das correspondentes consequências a ter em conta (Trijssenaar-Buhre *et al*, 2005):

- Lista de controlo (*Checklist*): instrumento de avaliação de equipamentos, materiais ou procedimentos que permite verificar o cumprimento de determinados requisitos e detectar também a possibilidade de ocorrência de cenários pré definidos.
- Análise de situações hipotéticas (*“what if” analysis*): técnica muito simples, utilizada pelos especialistas de cada área técnica envolvida, em que se pretende analisar

qualitativamente cenários hipotéticos, as suas consequências e eventuais medidas correctivas;

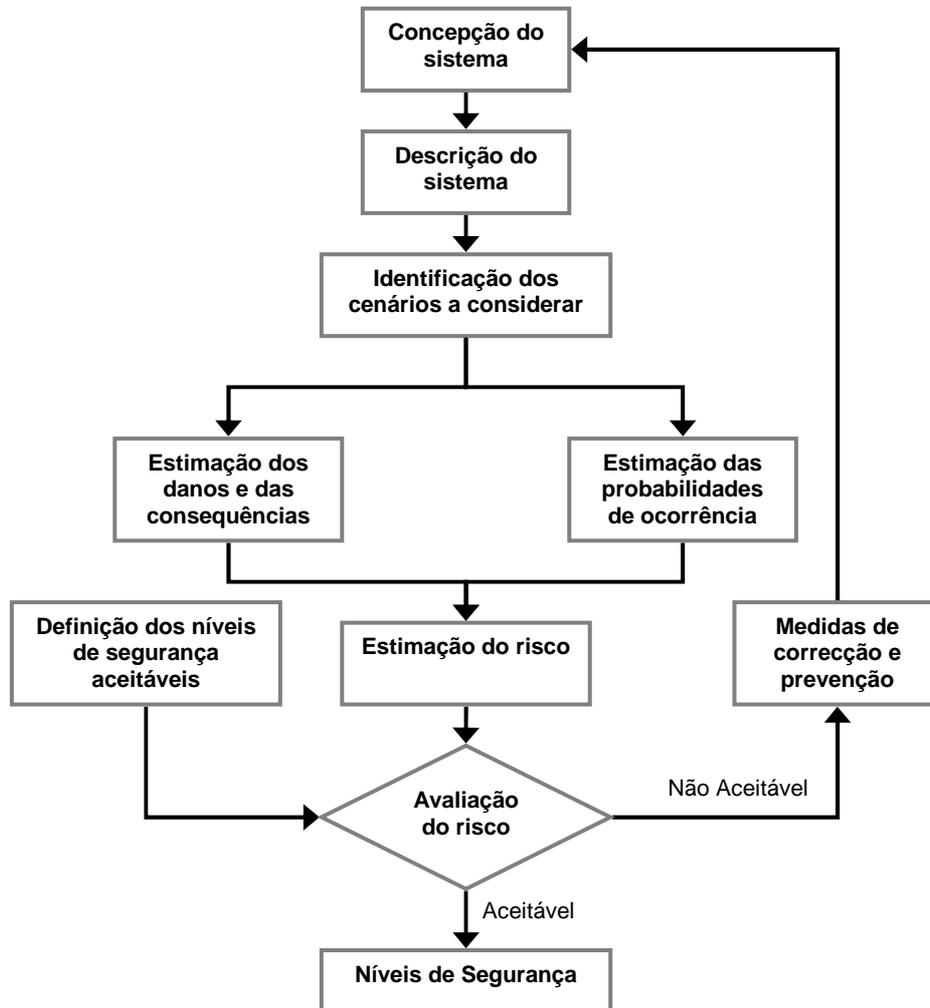
- Análise de risco e de operacionalidade (*hazard and operability analysis* – HAZOP): considerada como um dos métodos de identificação de cenários mais estruturado; com esta análise pretende-se detectar todos os desvios verificados relativamente aos objectivos e funcionalidades pré-definidos num determinado projecto, identificando simultaneamente as causas e consequências de tais desvios;
- Modo de falha e análise de situações críticas e seus efeitos (*failure mode, effects and criticality analysis* - FMECA): trata-se de uma lista das componentes de um projecto (ex.: equipamentos) identificando os modos de falência do sistema e os respectivos efeitos resultantes;
- Acidente mais provável (*maximum credible accident analysis* - MCA): análise dos acontecimentos e efeitos mais graves associados a um determinado evento;
- Análise por árvore de acontecimentos (AAA): sistema de diagramas no qual se define um determinado cenário inicial, enumerando posteriormente os acontecimentos subsequentes e todas as consequências a eles associadas;
- Análise por árvore de efeitos (AAE): sistema de diagrama no qual se define um efeito (indesejado) específico e se analisam os vários cenários capazes de causar esse efeito;
- Análise causa–efeito: com esta técnica pretende-se relacionar as consequências específicas de um acidente com cada uma das possíveis causas, sendo considerada como uma união das duas análises anteriores (AAA+AAE).

As AAA e AAE são os métodos mais utilizados actualmente na selecção de cenários em análises de risco em túneis rodoviários.

Relativamente à avaliação de riscos, as DRA, referidas no Capítulo 2, são uma das vertentes base usadas nas análises de risco em túneis rodoviários. Na sua aplicação são considerados três modelos sequenciais (Trijssenaar-Buhre *et al*, 2004): o **modelo de efeitos físicos**, o **modelo de danos** e o **modelo de evacuação**. O primeiro, preponderante nos cenários de incêndio, serve para descrever os efeitos da temperatura, do fumo e da limitação da visibilidade em caso de acidente, em função do sistema de ventilação, da geometria do túnel e de outras características próprias do túnel em análise. O **modelo de danos** serve para avaliar os efeitos das condições modeladas anteriormente sobre os utentes e estimar o tempo máximo disponível para evacuação em segurança. O **modelo de evacuação** permite determinar o tempo de evacuação ou refúgio em local seguro dos

utentes presentes no interior do túnel. As DRA são frequentemente utilizadas na preparação e treino dos serviços de emergência, visto que é criada uma sequência de imagens pormenorizadas correspondendo a etapas relevantes do desenrolar do acidente.

Figura 3.1 | Esquematização das análises de risco em túneis rodoviários – PRA / QRA



As PRA (utilizadas em análises de risco denominadas por **análises quantitativas de risco - QRA**) têm em conta, como já referido, não só os danos de um determinado cenário, mas também as respectivas frequências de ocorrência. Este método tem a vantagem de permitir avaliar o risco de vários cenários, consoante a confiabilidade das várias medidas de segurança e dos procedimentos de gestão e emergência aplicados. Uma PRA é constituída por dois modelos distintos: o **modelo de estimação de probabilidades** e o **modelo de estimação de consequências**. No primeiro, recorre-se normalmente à AAA ou à AAE, onde são atribuídas probabilidades a todos os eventos presentes na árvore. No segundo, realizam-se os mesmos passos que na DRA, mas de forma simplificada, obtendo-se

resultados com um menor nível de pormenor (Trijssenaar-Buhre *et al*, 2004). Para além destes modelos básicos são ainda frequentemente utilizados outros instrumentos de análise, tais como modelos de estudo de erro humano ou métodos de análise de sensibilidade de efeitos inter-dependentes.

O DG-QRAM, analisado no Capítulo 4, e outras PRA que formam a maioria das análises de risco em túneis rodoviários (ver Capítulo 3.2), têm a estrutura geral representada na Figura 3.1.

3.2 Métodos Utilizados

As análises de risco em túneis rodoviários são aplicadas correntemente em diversos países, como o Canada, França, Reino Unido, Holanda, Áustria, Suécia e E.U.A. Devido a serem um método de aplicação recente, não existem ainda critérios uniformizados na sua concepção e aplicação. No entanto, a actividade em alguns fóruns internacionais como a PIARC, a UE e a UNECE tem incidido nesta problemática, numa tentativa de criar métodos eficientes e aplicáveis a vários países e de promover a troca de experiências.

Considerando a diversidade de modelos existentes e a falta de informação relativamente a modelos não acessíveis, de utilização restrita, neste capítulo descrevem-se alguns métodos de análise de risco em túneis rodoviários. Não se pretendeu comparar todas as práticas existentes, mas sim salientar as principais características na sua concepção e aplicação (Trijssenaar-Buhre *et al*, 2004).

3.2.1 DRA do Centro de Segurança em Túneis (Holanda)

Este método, concebido pelo Ministério dos Transportes, Água e Obras Públicas holandês, permite estudar a resposta de um determinado túnel e das respectivas medidas técnicas e organizacionais implementadas relativamente a alguns cenários previamente definidos (incidentes, colisões, incêndios, explosões e fuga ou derrame de materiais perigosos). Com o intuito de otimizar as condições de segurança nas várias fases de um acidente, as respostas associadas aos processos de emergência e de evacuação são o principal objecto de estudo. Os resultados desta análise são apresentados sob a forma *qualitativa*, com a descrição sucinta de cada momento relevante do acidente, avaliando o estado de resposta do sistema, e *quantitativa*, com o cálculo de alguns valores como o número de pessoas no túnel, a intensidade do incêndio ou número de vítimas. Estes resultados não são

apresentados sob forma de gráficos ou diagramas, mas sim através de uma descrição associada a uma eventual indicação de valores numéricos de referência. Não existe actualmente um critério de aceitabilidade aplicável à DRA holandesa, sendo este método utilizado sobretudo na análise comparativa de soluções alternativas.

3.2.2 SIMULEX (Escócia)

Classificado como DRA, o SIMULEX consiste num modelo de análise de evacuação em situações de incêndio em acidentes em túneis rodoviários. Após uma descrição pormenorizada do túnel, da respectiva ocupação, e da caracterização dos utentes, os resultados são obtidos através de modelos de computação de dinâmica de fluidos (CFD). Este método permite estimar o tempo de saída necessário às pessoas presentes no interior do túnel e simular, através de imagens 2D, todo o processo de evacuação.

3.2.3 Modelo do TNO (Holanda)

Com esta PRA pretende avaliar-se as consequências de um incêndio num determinado túnel, estimando o número total de feridos e mortos. Muito utilizado em estudos de incêndios em túneis ferroviários, permite também avaliar a eficiência de medidas de segurança através de análise de sensibilidade e comparação entre cenários de acidente em túneis rodoviários. Feita a caracterização do túnel recorre-se a AAA na análise de cenários possíveis e das respectivas probabilidades. Estas probabilidades são arbitradas tendo em conta o TMDA, as medidas de prevenção e minimização de risco aplicadas e eventuais falhas no funcionamento destas medidas. Após a escolha dos cenários (tipos de incêndios) a estudar, e uma vez determinadas as características de ocupação do túnel, é realizada uma análise de sensibilidade às medidas de segurança aplicadas (exemplo: espaçamento entre as saídas de emergência), usando como critério de utilidade a variação no número de mortos e feridos.

3.2.4 TUSI (Noruega)

Este modelo norueguês, do tipo PRA, permite estimar apenas frequências de incidentes, acidentes e incêndios em túneis novos e existentes. Na estimação destas frequências são usados os seguintes dados: taxa de acidentes observada em secções de estrada a céu aberto com geometria similar, limites de velocidade, sentidos de circulação, Tráfego Médio Diário Anual (TMDA), percentagem de veículos pesados, comprimento do túnel e vários elementos geométricos de projecto. Os resultados apresentados pelo método são taxas de

incidentes, acidentes e incêndios, constituindo, assim, um modelo de estimação de probabilidades susceptível de ser utilizado em PRA.

3.2.5 QRA da Universidade de Lund (Suécia)

Seguindo o procedimento de uma PRA, com este método são avaliados os efeitos sobre os utentes de cenários de acidentes envolvendo incêndios ou explosões (queimaduras e efeitos de gases libertados) e as respectivas condições de evacuação verificadas (filas e tempos) em túneis unidireccionais. Recorrendo à análise de cenários e probabilidades por AAA, e cumprindo os passos das QRA apresentados na Figura 3.1, a probabilidade de cada cenário é determinada a partir de diversas bases de dados (com valores registados na Suécia e na Alemanha). São ainda determinados os números de feridos e mortos para cada cenário, representados sob a forma de *curva F/N* (ver Figura 4.3, no Capítulo 4).

3.2.6 DG-QRAM (PIARC)

O DG-QRAM tem como objectivo a avaliação quantitativa do risco no transporte rodoviário de mercadorias perigosas (PRA). Este modelo, apresentado em pormenor no Capítulo 4, permite estimar simultaneamente as consequências e as probabilidades de ocorrência de vários cenários previamente escolhidos.

3.2.7 TunPRIM do Centro de Segurança em Túneis (Holanda)

O TunPRIM serve para estabelecer objectivos e critérios na análise dos níveis de segurança em túneis unidireccionais em serviço. Tal como nas restantes QRA, este modelo, desenvolvido na Holanda, segue a estrutura base apresentada na Figura 3.1: identificação de situações iniciais, análise de cenários com AAA (incluindo cenários envolvendo acidentes com veículo de transporte de mercadorias perigosas), determinação das probabilidades de ocorrência, estimação das respectivas consequências e cálculo do risco total. A estimação das consequências é feita através de uma *DRA do Centro de Segurança em Túneis (Holanda)* simplificada, onde a análise descritiva é subalternizada em prol do cálculo das probabilidades e do número de feridos e mortos para os vários cenários considerados na AAA. Os resultados são apresentados sob a forma de valor total do risco esperado (EV) e de curvas *F/N* (ver Figura 4.3, no Capítulo 4) para o túnel analisado.

3.2.8 TURISMO (Áustria - Kohl et al, 2007)

Este modelo desenvolvido pela *ILF Consulting Engineers* insere-se no grupo das PRA com estrutura apresentada na Figura 3.1. Semelhante ao TunPRIM ou ao DG-QRAM, trata-se de um método composto por um modelo de análise de cenários e de probabilidades (AAA com probabilidades estimadas através dos acidentes registados em 81 túneis austríacos) e um modelo de estimação das consequências de acidentes (formado por um modelo de evacuação – *BuildingExodus 4.0* – e um modelo linear de ventilação). Contrariamente aos dois modelos anteriores, no TURISMO não é contemplada a análise de acidentes com mercadorias perigosas, nem os resultados são apresentados sob a forma de curvas F/N (ver Figura 4.3, no Capítulo 4). Os resultados são apresentados unicamente sob a forma de valor total do risco esperado (EV) o qual é, posteriormente, comparado com o EV calculado para um túnel equivalente mas com os requisitos mínimos estabelecidos na Directiva 2004/54/CE.

3.2.9 Síntese dos Métodos Utilizados

Quadro 2 | Síntese dos métodos utilizados (adaptado de Trijsenaar-Buhre et al, 2004).

Método		Tipo de Avaliação dos Riscos	Cenários Considerados					Considerações e Cálculos					Bibliografia técnica acessível
			Incidentes	Colisões	Incêndios	Explosões	Materiais Perigosos	Identificação do Cenário	Cálculo de frequências de ocorrência	Estimação de efeitos físicos	Estimação de Danos	Consideração directa da evacuação	
3.2.1	DRA-CST	DRA	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•*
3.2.2	Simulex	DRA		•		•						•	
3.2.3	TNO	PRA			•				•	•	•	•	
3.2.4	TUSI	Prob.	•	•	•				•				
3.2.5	Lund	PRA			•	•		•	•	•	•	•	•
3.2.6	DG-QRAM	PRA			•	•	•	•	•	•	•		•
3.2.7	TunPRIM	PRA	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•*
3.2.8	Turismo	PRA		•	•			•	•	•	•	•	

* - Bibliografia técnica disponível em holandês

3.3 Exemplo de aplicação (Holanda)

O *Coentunnel*, aberto em 1966, situa-se na circular A10 de Amesterdão, na Holanda. A fim de aumentar a capacidade deste eixo rodoviário fundamental, foi prevista a construção de um segundo túnel paralelo ao primeiro, atribuindo cada sentido de tráfego a galerias distintas. Sendo os túneis uma infra-estrutura rodoviária de custos acrescidos, concluiu-se que aumentando a inclinação máxima em perfil longitudinal de 4,5% (máximo permitido pela regulamentação holandesa) para 6% se obteria uma redução considerável no investimento. Em contrapartida inclinações mais acentuadas podem resultar numa diminuição do nível de segurança. Foi então realizada uma análise de risco associada a um estudo de custo-benefício com o intuito de avaliar os impactes desta medida. Os impactes reflectem-se não só ao nível da segurança, mas também em características de tráfego tal como atrasos e níveis de serviço. O Departamento de Estradas do Ministério dos Transportes, Água e Obras Públicas holandês recorreu ao processo de análises de risco desenvolvido pelo Centro de Segurança em Túneis do mesmo ministério tendo a análise de custo-benefício sido efectuada recorrendo ao sistema de apoio à decisão (DSS – *Decision Support System*) do Ministério. O processo de avaliação do risco e de estimação de custos realizado consistiu nos seguintes passos (Broeren, 2005):

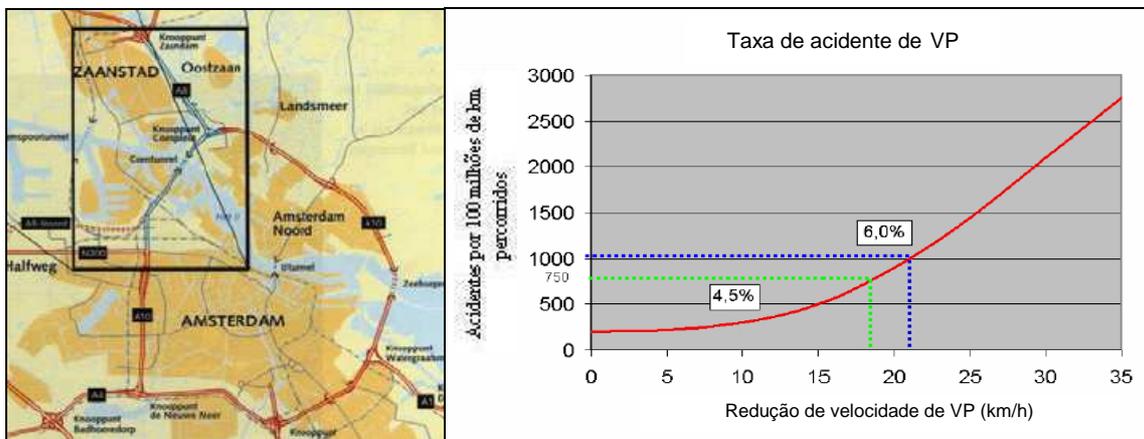
- Determinação das velocidades de veículos pesados (VP) utilizando o SimVra+, um programa de estimação de velocidades de VP, baseado nos registos de velocidades verificadas em território holandês;
- Estimação da diferença entre as taxas anuais de acidente envolvendo VP para as duas inclinações em análise, através do manual da AASHTO, “*A policy on geometric design of highways and streets*”;
- Determinação das taxas anuais de acidentes, de mortos e de feridos relativamente a veículos ligeiros e pesados, para as duas inclinações em análise, recorrendo às taxas de acidente registadas em estradas holandesas – QRA;
- Simulação do funcionamento do túnel em situação normal (com o software de micro simulação criado para o estudo do comportamento dos condutores nas estradas holandesas - FOSIM), determinando-se a capacidade, os tempos de percurso e outras características do sistema para as duas alternativas. Nesta tarefa foram considerados o volume de tráfego e a percentagem de pesados estimados em projecto.
- Estimação das perdas de tempo em situações de acidente, recorrendo novamente

ao programa FOSIM;

- Estimação da totalidade dos custos ao longo do tempo de vida da infra-estrutura, relativamente às duas alternativas (DSS), considerando: feridos, mortos, danos materiais em veículos e no túnel, atrasos devido a acidentes, tempos de percurso entre as duas soluções, custos de manutenção e custos de construção. Neste processo de avaliação de custos são tidos em conta mais de 70 parâmetros de caracterização da geometria, do tráfego, dos incidentes e acidentes, de manutenção e económicos.

Após realização de uma análise de sensibilidade aos resultados obtidos, concluiu-se que os custos associados à alteração do nível da segurança e das condições de tráfego para a solução do túnel com 6% de inclinação máxima não compensam os ganhos nos custos de investimento relativamente à solução de 4,5% de inclinação máxima. Este tipo de abordagem demonstra a possibilidade da quantificação dos efeitos de várias condicionantes envolvidas na concepção de uma infra-estrutura, sublinhando a utilidade da análise de risco como elemento da fase de projecto de túneis rodoviários.

Figura 3.2 | Localização do *Coentunnel* e relação entre velocidades de VP e taxa de acidente – AASHTO (Broeren, 2005)



4.1 Conceito

O DG-QRAM (*Dangerous Goods -Quantitative Risk Assessment Model*) tem como principal objectivo avaliar quantitativamente os riscos associados ao transporte rodoviário de mercadorias perigosas, tanto em túnel como em secções a céu aberto. Este modelo permite aos utilizadores (Knoflacher *et al*, 2006):

- Comparar os riscos em itinerários alternativos quando se pretende, por exemplo, estudar as diferenças ao nível da segurança entre uma solução com e sem túnel.
- Avaliar as medidas regulamentares da circulação em túneis rodoviários (ex.: proibição ou condicionamento da circulação de veículos de transporte de mercadorias perigosas).
- Comparar o risco ao longo de um determinado itinerário com valores de aceitabilidade previamente definidos.
- Avaliar medidas técnicas de redução do risco em túneis rodoviários, como sejam os sistemas de ventilação, drenagem ou disposições de emergência e evacuação (ex.: espaçamento entre saídas de emergência).

A concepção do modelo, iniciada em 1996, foi da responsabilidade do INERIS (*Institut National de l' Environnement Industriel et des Risques* - França), da WS Atkins (Reino Unido), do *Institute of Risk Research* (Áustria) e da Universidade de Waterloo (Canada), sob supervisão de um comité conjunto da OECD e PIARC. O programa permite estimar frequências de acidentes e dos respectivos danos, para um conjunto de cenários previamente definidos pelo próprio DG-QRAM, sob determinadas condições que caracterizam o itinerário em análise. Estas condições são constituídas não só pela informação de base necessária, a introduzir pelo utilizador, mas também pelos múltiplos pressupostos intrínsecos ao programa utilizados na fase de cálculo.

No Quadro 3 listam-se os tipos acidentes considerados no DG-QRAM. Como já foi referido, estes cenários contemplam apenas situações envolvendo VP ou veículos pesados de mercadorias perigosas (VPMP). Salienta-se, no entanto, que somente os cenários envolvendo VPMP estão completamente funcionais, uma vez que os cenários 1 e 2, respeitantes aos cenários de acidente com VP, não se encontram actualmente calibrados

no modelo. Os resultados obtidos para estes dois casos podem apresentar desvios consideráveis, tornando a respectiva análise pouco rigorosa e merecedora de cuidados acrescidos. Diferentes acontecimentos e substâncias são considerados nos 13 cenários previstos pelo DG-QRAM, sendo conveniente o conhecimento dos fenómenos biológicos, físicos e químicos associados às respectivas implicações estruturais e fisiológicas, tais como, a explosão de vapor proveniente da expansão de líquido em ebulição (*Boiling Liquid Expanding Vapour* - BLEVE), a explosão de nuvem de vapor com frente de onda supersónica (*Vapour Cloud Explosion* -VCE) e fenómenos específicos de determinadas substâncias como o gás de petróleo liquefeito (*Liquefied Petroleum Gaz* - LPG) ou a acroleína (também designada como acraldeído: CH₂ - CHCHO).

Quadro 3 | Cenários de acidente considerados no DG-QRAM

Nº do Cenário	Descrição	Capacidade do tanque	Comprimento da fissura (mm)	Fluxo de massa (kg/s)
1	Incêndio 20 MW *	-	-	-
2	Incêndio 100 MW *	-	-	-
3	BLEVE de LPG (cilindro)	50 kg	-	-
4	Incêndio em piscina – álcool	28 ton	100	20.6
5	VCE – álcool	28 ton	100	20.6
6	Libertação de cloro	20 ton	50	45
7	BLEVE de LPG	18 ton	-	-
8	VCE – LPG	18 ton	50	36
9	Incêndio de LPG em tocha	18 ton	50	36
10	Libertação de amónio	20 ton	50	36
11	Libertação de acroleína	25 ton	100	24.8
12	Libertação de acroleína (cilindro)	100 litros	4	0.02
13	BLEVE de CO ₂ liquefeito	20 ton	-	-

* - Intensidade de um incêndio expressa pela potência (mega watt – MW)

Tal como referido no Capítulo 3.1 para as PRA, para além do módulo de escolha dos cenários a estudar, o DG-QRAM é constituído por um **modelo de estimação de probabilidades** e um **modelo de estimação de consequências**.

O **modelo de estimação de consequências** é composto por duas componentes: avaliação dos efeitos físicos, onde são determinadas as distâncias de influência considerando a geometria do túnel, os sistemas de ventilação e drenagem e os processos de evacuação e abrigo; e avaliação dos efeitos fisiológicos, onde os efeitos físicos (C - concentrações tóxicas, sobrepressões ou fluxos radioactivos) associados a um determinado tempo de exposição (t) são transformados em efeitos fisiológicos através de funções Probit.

Esta última avaliação é utilizada mediante aplicação de um método desenvolvido por Bliss em 1934 no estudo de pesticidas, em que é efectuada a transformação da percentagem de população afectada numa unidade de probabilidade (Probit). Na obtenção desta função Probit particular, é adicionado 5 ($\mu = 5$) ao valor médio da inversa da distribuição acumulada da função normal padronizada ($\mu = 0$ e $\sigma = 1$), permitindo que a função apresente sempre valores positivos, adequados ao sinal da variável concentração (ver Figura 4.1). As percentagens de pessoas afectadas, considerando a intensidade de um dado efeito (ex.: concentração de uma substância tóxica num dado período de tempo), são representadas por curvas S (curva sigmoidal), semelhantes à distribuição acumulada da função normal. A transformação Probit permite, assim, a linearização da relação entre a intensidade do efeito (função da concentração, sobrepressão ou fluxo C , e do tempo de exposição t) e a percentagem acumulada de vítimas, ajustando-a a uma dada amostra (Cassini *et al*, 2007):

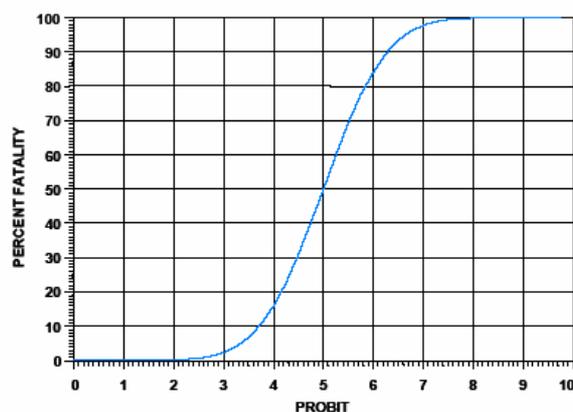
$$Pr = a + b \cdot \ln(C^n \cdot t)$$

As constantes a , b e n são obtidas pela regressão linear de registos existentes ou de uma dada amostra (intensidade de efeito versus efeito fisiológico) utilizada no estudo de um dado efeito.

$$\% \text{ de vítimas} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

Os acidentes com mercadorias perigosas considerados no DG-QRAM incluem a difusão e propagação de substâncias tóxicas, sobrepressões e radiações térmicas, fenómenos cujo efeito sobre a população depende sempre de duas variáveis: intensidade e tempo de exposição. Importa referir que alguns autores sugerem outro tipo de transformações Probit na determinação de alguns efeitos físicos, nomeadamente os devidos a radiações térmicas.

Figura.4.1 | Função Probit



Os parâmetros que determinam a evolução no tempo e no espaço dos efeitos físicos foram estimados fora do DG-QRAM, utilizando modelos e aplicações específicas de simulação e avaliação tais como o *Mutil Energy Model* (para situações de VCE), o *Phast 4.2* (para incêndios em tocha e para a libertação de gases tóxicos), o *T.R.C. Model* (no caso de BLEVE) e ainda o *FNAP* (para incêndios em piscina).

No **modelo de estimação de probabilidades** são usadas as taxas de acidentes rodoviários, desagregados por tipo (colisão, capotamentos e despistes), expressas em ocorrências por milhão de veículos-quilómetro, as percentagens de VP e de VPMP no tráfego total, as percentagens de acidentes com VP e VPMP que podem originar um dos cenários considerados e finalmente as probabilidades de ocorrência dos cenários em análise aquando de um acidente. O número de ocorrências do cenário j que envolvam VP (NHA_{ij}) e o número de ocorrências do cenário j que envolvam VPMP (NDA_{ij}), por ano, na secção i são obtidos através das seguintes equações:

$$NHA_{ij} = SHA_{ij} \cdot AH_i \cdot TH_i \cdot 365 \times 10^{-6} \cdot L_i$$

$$NDA_{ij} = SDA_{ij} \cdot AD_i \cdot TD_{ij} \cdot 365 \times 10^{-6} \cdot L_i$$

e

$$AD_i = k_D \cdot AH_i$$

$$TD_{ij} = \alpha_j \cdot \beta_i \cdot TH_i$$

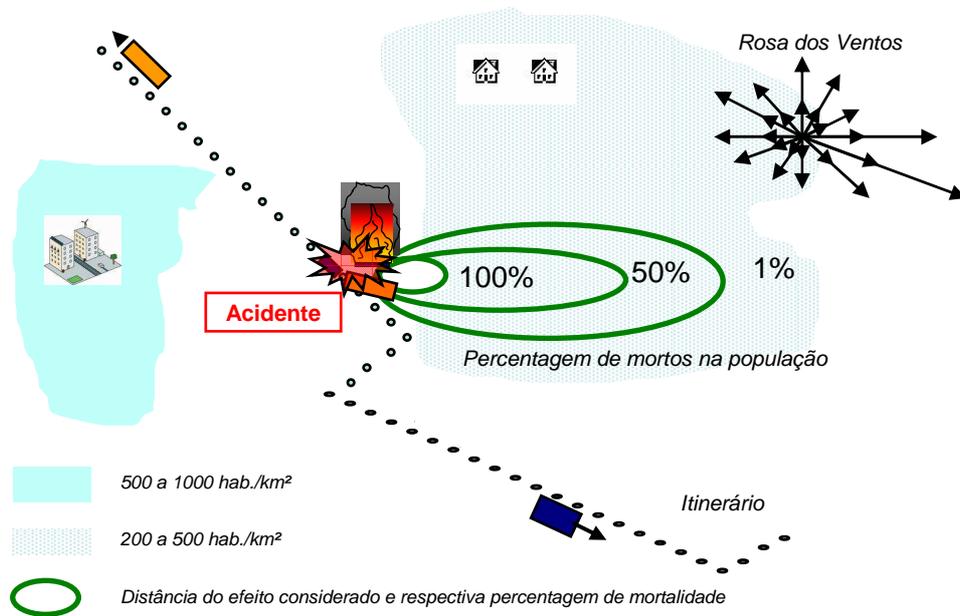
Sendo:

- SHA_{ij} ou SDA_{ij} – probabilidade do cenário j dada a ocorrência de um acidente com VP ou VPMP na secção i ;
- AH_i ou AD_i – número de VP ou VPMP envolvidos em acidentes (veículos/ 10^6 veículos x km);
- TH_i ou TD_{ij} – Tráfego médio diário de VP ou VPMP que originem o cenário j , na secção i (10^6 veículos/dia);
- L_i – comprimento da secção i (km)
- k_D – factor correctivo entre acidentes com VP e acidentes com VPMP;
- α_j – percentagem de VPMP susceptível de originar o cenário j no tráfego de VPMP;
- β_i – percentagem de VPMP do tráfego de VP na secção i .

Tendo como base os dois modelos acima descritos, são definidos pelo DG-QRAM três zonas na estimação total do risco, associadas a percentagens distintas (100%, 50% e 1%)

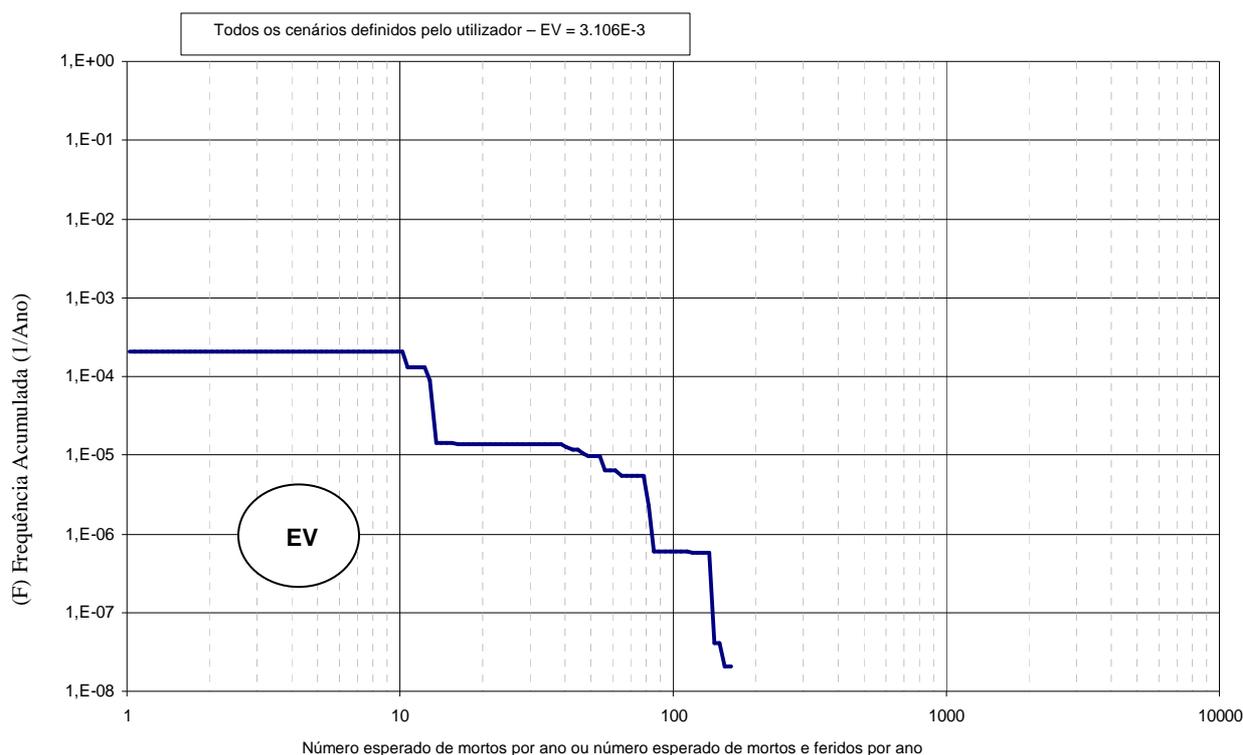
de mortalidade (ou de mortos e feridos) da população exposta aos efeitos. Na Figura 4.2 estão esquematizadas as principais variáveis consideradas no DG-QRAM para estimação do risco e das consequências de um acidente.

Figura 4.2 | Esquematização de um acidente a céu aberto no DG-QRAM (Cassini *et al*, 2007)



Definidas as características respeitantes ao tráfego, à geometria do túnel, aos sistemas de drenagem e de ventilação e ao ambiente envolvente, os resultados obtidos são apresentados sob a forma de *curvas F/N* (ver Figura 4.3) para um ou mais cenários considerados. Estes gráficos ilustram as frequências anuais estimadas (F) das várias consequências possíveis de um determinado cenário por número de vítimas verificadas (N) – distribuição discreta. Para além destas curvas, o modelo permite determinar o valor total do risco esperado, associado a cada cenário (EV – *Expected Value*) o qual é definido pela área abaixo da curva F/N . Estas curvas, que constituem um resultado fundamental do DG-QRAM, permitem não só avaliar o risco total esperado para um ou vários cenários mas também a desagregação das consequências por vítimas mortais ou mortos mais feridos ou por períodos distintos previamente definidos (ex.: diário/nocturno ou Verão/Inverno), através de várias corridas do modelo.

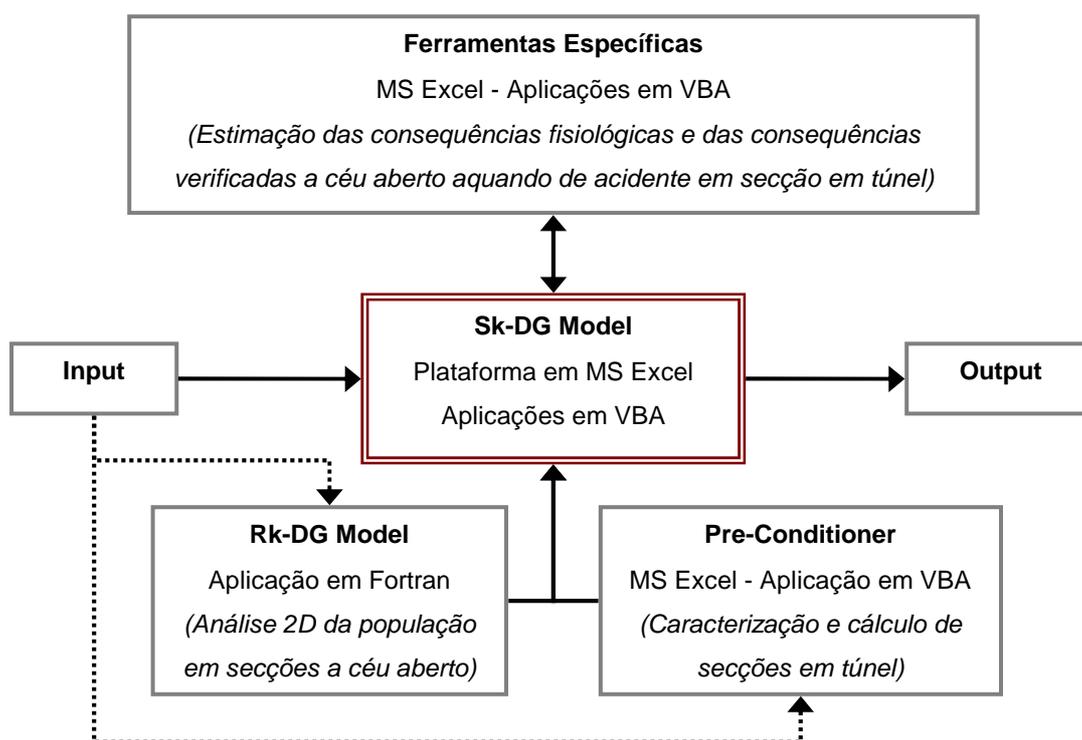
Figura 4.3 | Exemplo de Curva F/N (Cassini et al, 2007)



4.2 Funcionamento

O DG-QRAM foi criado em MS Excel e ambiente DOS, através de várias funções e aplicações complexas programadas em linguagem VBA e Fortran. O programa é constituído por um módulo principal de cálculo (*Sk-DG Model*) ao qual estão ser associados outros módulos de cálculo auxiliares e de introdução e tratamento de dados (ver Figura 4.4). É através do *Sk-DG Model* que são introduzidos os principais dados do sistema e efectuados os cálculos da análise de risco. O *Rk-DG Model* pode ser utilizado em secções a céu aberto, permitindo uma descrição 2D pormenorizada, em grelha, da densidade populacional da zona envolvente ao itinerário em estudo. Por fim, o *Pre-Conditioner* tem como objectivo a geração de parâmetros que permitem considerar configurações alternativas de trechos de túnel, tendo em conta a sua estrutura, geometria, sistemas de drenagem e ventilação ou ainda medidas de minimização de risco. Estes dois módulos (*Rk-DG Model* e *Pre-Conditioner*) produzem resultados que são automaticamente utilizados nos cálculos do *Sk-DG Model*.

Figura.4.4 | Estrutura do DG-QRAM (Cassini *et al*, 2007)



A informação necessária na análise de risco é numerosa e de natureza variada (ver Quadro 4). A realização das análises é facilitada, no entanto, pela existência de valores de referência pré-definidos para alguns parâmetros de cálculo.

Na maioria dos casos, os valores de referência indicados, no Quadro 4, pelo DG-QRAM estão associados à escolha do país onde se situa o caso de estudo, estando correctamente calibrados para um número pequeno de países (França, Áustria, Canadá, EUA, Noruega e Holanda).

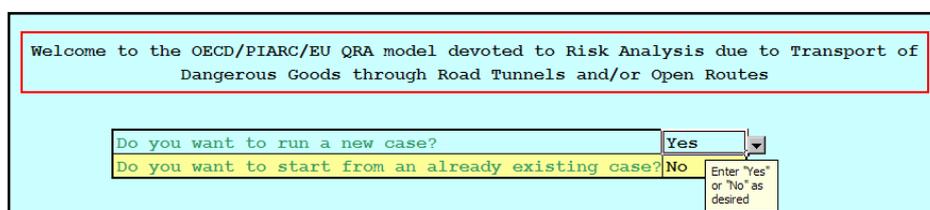
A introdução de dados sobre um caso de estudo específico envolve vários módulos, sendo possível, nalguns casos, a introdução de informação de diversas maneiras. É o caso da descrição da população onde se pode recorrer a uma definição 2D, em grelha (*Rk-DG Model*), ou a uma definição linear com valor constante ao longo do itinerário.

Quadro 4 | Dados de entrada do DG-QRAM

Informação	Caracterização do cálculo	Caracterização do caso de estudo	
		Sem valor de referência	Com valor de referência
Nº de períodos a considerar	•		
Definição de períodos	•		
Número de sentidos	•		
Análise de sentidos (conjunta ou separada)	•		
Tipo de descrição da população (linear ou 2D)	•		
Taxas de ocupação de veículos			•
Tráfegos de VPMP		•	
Percentagens dos vários tipos de VPMP			•
Tipo de estrada (urbana ou rural)		•	
Coordenadas das várias secções de estrada		•	
Número de vias		•	
Tráfegos totais		•	
Percentagem de VP e autocarros		•	
Velocidades de veículos ligeiros e VP (e autocarros)		•	
Atraso na aproximação de tráfego intenso – paragem do tráfego		•	
Frequência de acidentes			•
Factor de correcção da freq. de acidentes para VPMP			•
Densidade de população			•
Descrição linear ou 2D da densidade de população		•	
Seleccção do País		•	
Rosa-dos-ventos		•	
Geometria do túnel		•	
Segmentos e respectivas extensões do túnel		•	
Ventilação normal		•	
Ventilação de emergência		•	
Drenagem		•	
Medidas de minimização de risco		•	
Tipo de estrutura do túnel		•	

Existem duas formas de introduzir os dados: introduzindo todos os dados necessários através de janelas sucessivas (*dialog boxes*) ou utilizando directamente um ficheiro Excel já preenchido (ver Figura 4.5). Os dados devem ser introduzidos para os vários períodos de cálculo (até 3 períodos distintos) e sentidos de circulação considerados.

Figura.4.5 | Iniciação do DG-QRAM (Cassini *et al*, 2007)



Para além da informação referida no Quadro 4 existem vários parâmetros intrínsecos do programa que podem ser alterados, através do módulo *Expert User Interface*. Esta folha de Excel permite modificar algumas condicionantes, habitualmente não acessíveis, na plataforma genérica do DG-QRAM apresentada na Figura 4.4, tais como:

- Percentagens de afectação dos efeitos utilizadas no cálculo de consequências de cada cenário (predefinidas: 100%, 50% e 1% - ver Capítulo 4.1);
- Constantes das funções Probit de determinação de efeitos fisiológicos;
- Desagregação da população segundo as suas possibilidades de fuga ou protecção (tolerância) relativamente a substâncias tóxicas, sobrepressões ou radiações;
- Parâmetros de cálculo do *Rk-DG Model* (definição de grelha 2D, consideração dos utilizadores da estrada ou só risco na população, nível de pormenor do cálculo 2D...);
- Comprimento dos veículos para análise das filas de trânsito;
- Número e posição dos locais de simulação de acidente no interior de uma secção em túnel (predefinido: 5 locais – $0.17L$, $0.33L$, $0.5L$, $0.67L$, $0.83L$ sendo L a extensão do túnel);
- Probabilidades associadas à ocorrência de cada cenário de acidente com VPMP;
- Tempo entre o momento de acidente e o acontecimento de cada cenário (exemplo: tempo entre o momento de paragem de circulação devido a uma colisão e a explosão de um VPMP envolvido no acidente);
- Condições meteorológicas (distribuição de direcções e velocidades do vento) para o caso de uma definição linear da densidade populacional;
- Distâncias a ter em conta no cálculo do risco individual (nas zonas de afectação de efeitos, associadas à probabilidade de que uma pessoa situada num dado local durante um ano sofra influência de um ou mais acidentes considerados);
- Tempo e velocidade de evacuação dos utentes do túnel.

Tanto os parâmetros intrínsecos do DG-QRAM acima indicados, como os valores de referência do Quadro 4 condicionam forçosamente os resultados obtidos pelo programa. A sua aplicação a análises de risco ao nível nacional deve passar obrigatoriamente por uma verificação prévia da conformidade com a realidade portuguesa. Caso se verifique a necessidade de alteração destes valores, a transformação do modelo deve ser efectuada

tendo em conta várias cautelas, visto estarem envolvidas diversas especialidades nos modelos do DG-QRAM. Qualquer alteração passa pelo conhecimento adequado dos vários fenómenos envolvidos: fenómenos físico-químicos de materiais perigosos, efeitos fisiológicos associados, hábitos e reacções comportamentais dos condutores e outros utentes, projecto de infra-estrutura e respectiva influência em frequências de ocorrência de acidentes, funcionamento dos equipamentos e dos serviços de emergência instalados, etc. Adicionalmente, na adaptação ao contexto nacional, devem ser verificadas e correctamente estimadas as probabilidades de cada cenário, as taxas de acidente e as características de tráfego (percentagens de VPMP, taxas de ocupação, comprimento de veículos) referenciadas no DG-QRAM.

A fim de facilitar a sua utilização, compreensão e alteração, o programa DG-QRAM vem documentado com três manuais distintos. No *User's Guide* (145 páginas) é explicada a utilização do programa, sendo referidas as formas de introdução da informação necessária e como devem ser interpretados os resultados obtidos. No *Reference Manual* (358 páginas) são referidas as bases técnicas do programa no que diz respeito à escolha dos cenários, à avaliação das probabilidades de acidentes, à determinação de efeitos físicos e fisiológicos e ainda aos modelos de fuga e evacuação utilizados. Finalmente, no *Guide for the Expert User* (28 páginas) são listados os parâmetros intrínsecos que podem ser alterados no DG-QRAM por um utilizador conhecedor do tema.

4.3 Exemplo de aplicação (Áustria)

Em Janeiro de 2007 foi realizada nas instalações da PIARC, em Paris, a primeira sessão de divulgação do modelo DG-QRAM onde foram apresentados alguns exemplos de aplicação em França (pelo CETU – *Centre d'Etudes des Tunnels* e pela *Bonnard et Gardel* – Empresa suíça de gestão de projectos de infra-estruturas), no Reino Unido (por Robin Hall da *Mott MacDonald Ltd* – Consultora de projectos de engenharia e desenvolvimento sediada no Reino Unido), na Áustria (por Katharina Botscheck da *ILF Consulting Engineering* – Empresa internacional de consultoria industrial e em engenharia de infra-estruturas) e também na República Checa (por Ludvik Sajtar da *SATRA, Spol. Sro* – Empresa checa de consultoria em projectos de engenharia civil). Apesar do DG-QRAM ser bastante recente e estar ainda em fase de experimentação pela maioria dos utilizadores, existem alguns estudos práticos realizados sobretudo na fase de concepção e aperfeiçoamento do programa. Um destes estudos, citado também na referida sessão de divulgação, é o caso do túnel de *Tauern*, analisado pela Universidade Tecnológica de Viena em 2002 (Knoflacher

et al, 2002) e que se apresenta seguidamente de forma sucinta.

O túnel de *Tauern* tem 6 401 metros de comprimento, uma única galeria, um sistema de ventilação transversal e situa-se em ambiente rural, sob os Alpes austríacos. O acidente ocorrido neste túnel em 1999 foi utilizado na calibração do próprio modelo DG-QRAM. No estudo acima referido o túnel de *Tauern* é considerado para análise de medidas de minimização de risco. Foram estudados os efeitos de uma alteração no sistema de ventilação de emergência e a regulamentação de uma distância mínima entre veículos pesados de mercadorias.

Foram levantadas todas as características do sistema para uma correcta introdução de dados no DG-QRAM. Salientam-se ainda as seguintes particularidades na modelação do túnel:

- TMDA de 13 300 veículos e distribuição de tráfego de VPMP segundo o Quadro 6;
- 3 períodos distintos de cálculo (*Ponta, Normal e Noite* – Quadro 5);
- Velocidade máxima de 80 km/h para todos os veículos;
- Ocupação de 1.4 pessoas por veículo ligeiro, 1.1 por veículo pesado de mercadorias e 40 por veículo pesado de passageiros;
- Taxa de acidente de 0.129 acidentes por milhão de veículosxkm;
- Tempo necessário para paragem do tráfego de 1min;
- Alteração das cinco localizações de acidente para o cálculo de risco de acidente em túnel para os seguintes valores: 150, 180, 3 200, 6 221 e 6 251 m (alteradas no módulo *Expert User Interface*);
- Velocidade de evacuação dos utentes de 0.5m/s (alterada no módulo *Expert User Interface*).

Quadro 5 | Dados de tráfego – *Tauern* (adaptado de Knoflacher et al, 2002)

Período	Horas	Veículos / h	%VP mercadorias	%autocarros	VPMP / h
Ponta	11:00-19:00	795	22%	2%	3.12
Normal	5:00-11:00; 19:00-22:00	556	17%	2%	1.69
Noite	22:00-5:00	261	30%	1%	1.4

Quadro 6 | Distribuição dos vários tipos de VPMP – *Tauern* (adaptado de Knoflacher *et al*, 2002)

Mercadoria Perigosa	Percentagem no Tráfego de VPMP
Líquidos inflamáveis	53%
Percentagem dos Líquidos inflamáveis susceptíveis de provocar VCE	23%
Propano	0.20%
Propano em cilindro	0.80%
Amónio (e outros gases tóxicos)	1%
Mercadorias Perigosas susceptíveis de incêndio de 100MW (excepto líquidos)	16%
Outros (susceptíveis de incêndio de 20MW)	29%

O DG-QRAM exige uma modelação simplificada dos sistemas ventilação normalmente existentes em túneis rodoviários. O túnel de *Tauern* apresenta um sistema dividido em quatro segmentos (ver Figura 4.6) funcionando a 70% da sua potência máxima em regime normal. Na modelação da ventilação normal (ver Figura 4.7) foram considerados os valores médios de $133 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{km}$ para o ar introduzido e $80.5 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{km}$ para o ar extraído do túnel.

Figura.4.6 | Segmentação do sistema de ventilação normal - *Tauern* (adaptado de Knoflacher *et al*, 2002)

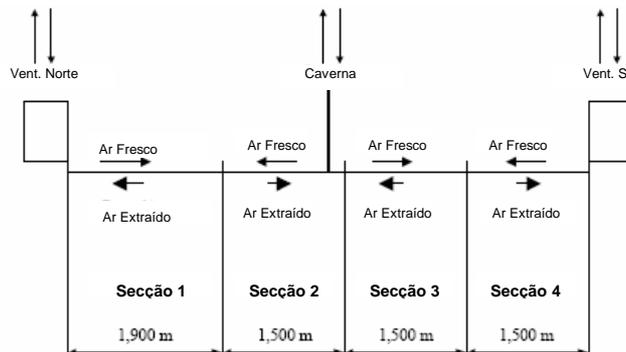
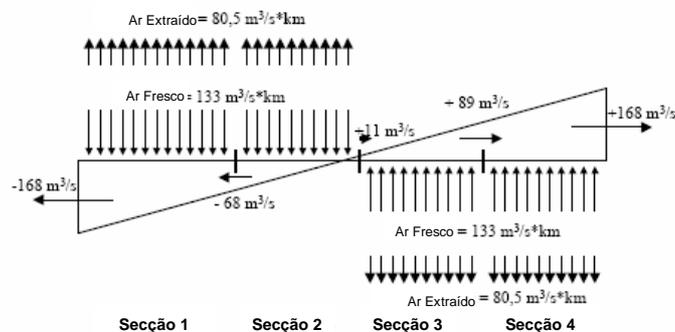
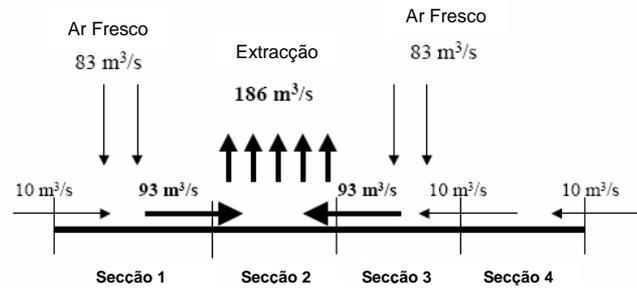


Figura.4.7 | Modelação dos fluxos da ventilação normal – *Tauern* (adaptado de Knoflacher *et al*, 2002)



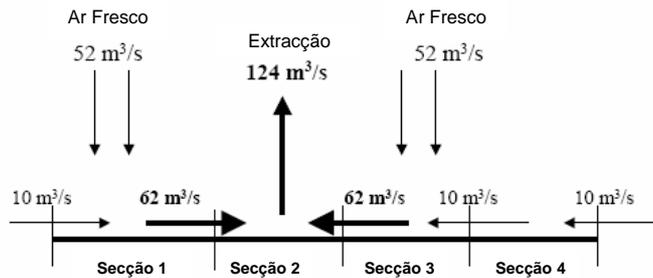
Assumiu-se que o sistema de ventilação de emergência original demora 4 minutos a atingir a potência máxima, sendo os fluxos de ar correspondentes modelados no DG-QRAM segundo a Figura 4.8.

Figura.4.8 | Modelação dos fluxos da ventilação de emergência original – *Tauern* (adaptado de Knoflacher *et al*, 2002)



No novo sistema de ventilação de emergência considerado (ver figura 4.9), existem 126 aberturas ao longo do túnel (espaçadas de 50 m) que são fechadas em situação de emergência, excepto a abertura localizada sobre o incêndio onde o ar é extraído. Tendo em conta que o novo sistema apresenta menores volumes de extracção foi considerado um menor tempo até o sistema de emergência atingir a sua potência máxima (2 minutos).

Figura.4.9 | Modelação dos fluxos da nova ventilação de emergência – *Tauern* (adaptado de Knoflacher *et al*, 2002)



Foram consideradas quatro cenários de decisão alternativos na análise de medidas de minimização:

- A solução *OLD* correspondente às condições originais do túnel;
- A solução *NEW1* onde é considerado o novo sistema de ventilação de emergência (Figura 4.9);
- A solução *NEW2* onde, para além do novo sistema de ventilação de emergência, é estipulado um espaçamento mínimo de 150 m entre um VP e o veículo que circula imediatamente à sua frente, transformando-se num espaçamento de 50 m em situação de tráfego parado;
- A solução *NEW3* onde são modelados o novo sistema de ventilação de emergência e um espaçamento de 100 m entre VP em situação de tráfego parado.

Nestas duas últimas soluções não se considera a variação da taxa de acidente envolvendo VP normalmente associada à limitação do respectivo espaçamento efectivo.

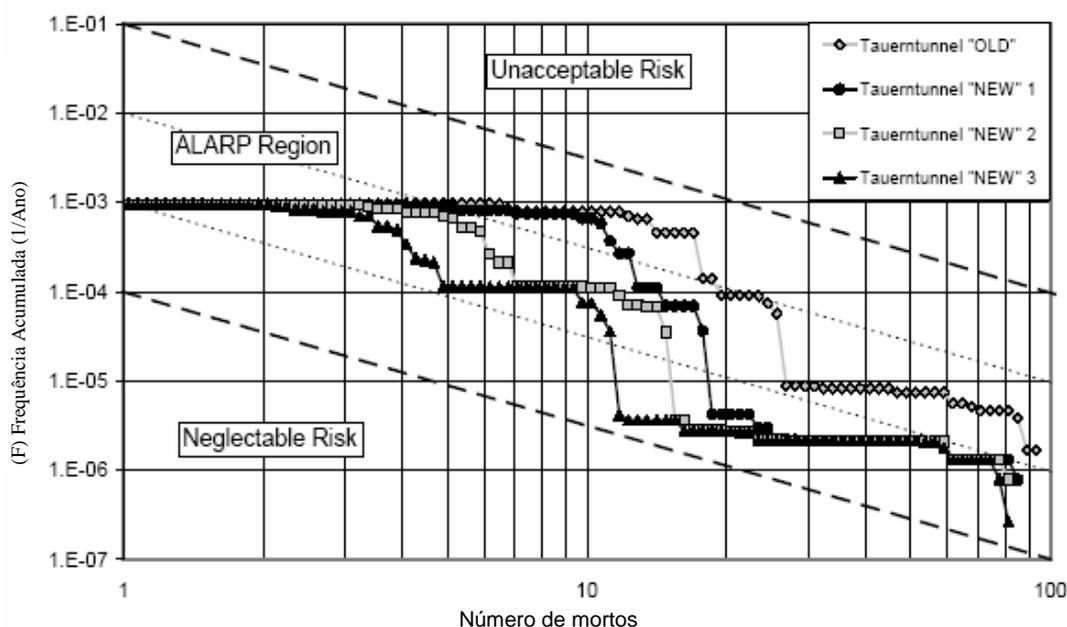
No Quadro 7 apresentam-se os valores esperados do risco de morte (EV) para cada uma das soluções consideradas. Verificou-se que o novo sistema de ventilação de emergência reduz o EV associado a todos os cenários de acidente em cerca de 30%. A maior redução do EV registou-se em cenários de acidente com produtos tóxicos (cerca de 80%). A limitação do espaçamento mínimo entre VP também reduz o valor de EV, com uma redução adicional entre 40% e 57% relativamente ao conjunto de cenários considerados pelo DG-QRAM. Esta medida apresenta valores de EV consideravelmente mais baixos para cenários de incêndio sem mercadorias perigosas (cenários 1 e 2 do DG-QRAM – incêndios de 20 e 100 MW respectivamente) e em acidentes com veículos de transporte de líquidos inflamáveis.

Quadro 7 | Valor esperado (EV) em mortos / ano – Tauern (adaptado de Knoflacher *et al*, 2002)

	OLD	NEW 1	NEW 2	NEW 3
Todos os cenários	1.428×10^{-2}	9.807×10^{-3}	5.901×10^{-3}	4.177×10^{-3}
Incêndios 20 e 100MW	1.046×10^{-2}	7.688×10^{-3}	4.146×10^{-3}	2.766×10^{-3}
Acidentes com líquidos inflamáveis	3.143×10^{-3}	1.853×10^{-3}	1.501×10^{-3}	1.175×10^{-3}
Acidentes com produtos tóxicos	5.008×10^{-4}	9.367×10^{-5}	8.691×10^{-5}	7.335×10^{-5}

As quatro *curvas F/N* associadas a cada uma das soluções estudadas são apresentadas na Figura 4.10. Verifica-se que o novo sistema de ventilação de emergência é mais eficaz em situações de acidente com elevado número de mortos, quando comparada com a limitação do espaçamento entre VP.

Figura.4.10 | Gráfico F/N – Tauern



A Figura 4.10 apresenta também critérios de aceitabilidade propostos pelo Instituto de Planeamento dos Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade Tecnológica de Viena que se encontram ainda em discussão. Estes critérios são definidos através de zonas do gráfico: zona de risco negligenciável (*Neglectable Risk*), risco inaceitável (*Unacceptable Risk*) e uma região denominada *ALARP Region (As Low As Rational Possible)*, correspondente aos túneis que devem ser submetidos a estudo dos efeitos das várias medidas de minimização de risco possíveis, designadamente através de análises custo-benefício. Seguindo os critérios estipulados em diversos países, a partir de determinado número de vítimas os acidentes podem ser considerados inaceitáveis independentemente da respectiva probabilidade de ocorrência. Nesses casos, a linha delimitadora da zona de risco inaceitável é vertical com ordenada no correspondente número máximo de vítimas.

A definição deste tipo de critérios de aceitabilidade foi sugerida em diversos países, como a Áustria, a Suíça, a Suécia, a Holanda e a República Checa, em várias análises de risco em túneis rodoviários, correspondendo não só a um valor total do risco admissível (número total de mortos por ano ou ao longo da vida útil da obra), mas também à frequência máxima de determinados tipos de acidentes, consoante o respectivo número de mortos. No caso de *Tauern* os critérios de aceitabilidade representados na Figura 4.10 correspondem a 0.18 mortos/ano para o risco inaceitável, e, admitindo que os acidentes com mais de 100 mortos são inadmissíveis, 0.00018 mortos/ano para o risco negligenciável. A estes valores corresponde um risco total inaceitável de 18 mortos para um tempo de vida de 100 anos – tempo de vida usualmente adoptado no dimensionamento estrutural de obras especiais.

Compete à sociedade, designadamente através das instâncias políticas e das entidades com competência regulamentadora, definir quais os níveis de aceitabilidade do risco. Ao meio técnico-científico cabe dar apoio a este processo de decisão, através do desenvolvimento de métodos de análise apropriados, de instrumentos de estimação do risco e da comunicação adequada dos resultados obtidos.

As medidas de minimização estudadas para o túnel de *Tauern* revelaram-se eficazes na redução do risco calculado. Tendo sido avaliadas quantitativamente, verificou-se que, tanto a alteração do sistema de ventilação de emergência como a actuação ao nível do comportamento dos condutores, com a limitação do espaçamento entre VP, permitiram reduzir o EV, sobretudo no que diz respeito a situações de elevado número de vítimas.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS E VIAS DE PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS

Os desenvolvimentos recentes no contexto técnico e legal nacional e europeu tornaram as análises de risco numa ferramenta útil e obrigatória no estudo da segurança da utilização dos túneis rodoviários. Esta análise tem sido objecto de vários desenvolvimentos teóricos e práticos recentes; no entanto, ela é, ainda, susceptível de aperfeiçoamentos e adaptações às crescentes exigências dos agentes envolvidos. Apesar da diversidade de conceitos fundamentais consoante as áreas de aplicação, existe alguma convergência no que diz respeito às práticas recentes verificadas no âmbito das análises de risco em túneis rodoviários.

Paralelamente a estas evoluções conceptuais, a aplicação prática das análises de risco tem sido acompanhada pela criação de vários programas de cálculo computacional, tendo em conta a complexidade dos estudos em causa, implicando um elevado número de cálculos numéricos e probabilísticos.

Prevendo-se a adopção das análises de risco como prática corrente nas várias fases da vida de infra-estruturas rodoviárias (e ferroviárias) parece prudente desenvolver o estudo destas práticas, no sentido da criação de conhecimento e experiência neste âmbito, que permitam a adequação de métodos e procedimentos adaptados à realidade do País.

O DG-QRAM foi concebido no seio da Comissão Técnica C3.3 da PIARC em conjunto com a OCDE, num contexto de aplicação internacional e de uniformização dos métodos de análise de risco aplicáveis a túneis rodoviários. Pretendendo contrariar as tendências naturais de criação de modelos de cálculo diferenciados em cada país, o método disponibilizado pela PIARC visa facilitar a utilização de tais modelos, visto que se trata de uma aplicação aberta (editável), de código legível e com uma aplicação elementar explicável em manuais teórico-práticos. Apesar destas vantagens evidentes, o DG-QRAM apresenta dois aspectos a ter em conta: neste momento, destina-se unicamente a avaliar quantitativamente os riscos associados ao transporte rodoviário de mercadorias perigosas, tanto em túnel como em secções a céu aberto; apresenta uma estrutura complexa, incorporando uma multiplicidade de conceitos, métodos, pressupostos e considerações que devem ser conhecidos e atendidos na utilização e interpretação de resultados.

Estas duas condicionantes não podem ser consideradas como limitações permanentes pois podem ser mitigadas tendo em conta as possibilidades de leitura e modificação do

programa salvaguardadas pela PIARC. No entanto, estas tarefas necessitam de um empenho cuidadoso a fim de permitir a compreensão do DG-QRAM e a sua transformação rigorosa e íntegra, possibilitando a obtenção de resultados confiáveis e coerentes quer com os conceitos gerais quer com as características relevantes do tráfego e dos serviços de emergência nacionais.

No Capítulo 4 do presente relatório foi apresentado sucintamente o DG-QRAM, sendo possível perceber a complexidade e multiplicidade de considerações presentes na utilização desta aplicação. Na primeira sessão de divulgação do modelo DG-QRAM, vários participantes referiram dificuldades na aplicação e compreensão de resultados nas suas recentes (e, então, primeiras) aplicações. A Comissão Técnica C3.3 da PIARC e os responsáveis pela concepção técnica do programa evidenciaram a necessidade de compreender correctamente o funcionamento e as considerações existentes nesta aplicação de um método probabilístico.

O LNEC adquiriu em Maio 2007 o programa DG-QRAM v.3.61 junto da PIARC, com o intuito de se apropriar de conhecimento no domínio da análise de risco, especificamente no âmbito das análises de risco em túneis e noutras infra-estruturas de transportes. Mantendo como principal objectivo uma aplicação deste tipo de análises de risco em Portugal, o DG-QRAM surge, neste contexto, como um instrumento de utilização acessível e viável. Todavia, uma aplicação corrente do programa, por parte de qualquer entidade, em casos de estudo específicos localizados no território nacional, necessita de uma adaptação de determinadas condicionantes de cálculo à realidade portuguesa.

Para o efeito, sugerem-se quatro linhas de continuação dos trabalhos, no âmbito do estudo alargado das análises de risco de operação em túneis rodoviários, a desenvolver pelo LNEC:

- Compreensão e análise dos múltiplos princípios e conceitos presentes no DG-QRAM, estudando todos os métodos utilizados através de um estudo exaustivo do código, do funcionamento e da estrutura desta aplicação.
- Adaptação à realidade portuguesa dos factores influentes no cálculo. Nos Capítulos 4.2 e 4.4 do presente relatório, foram identificadas várias características, populacionais, comportamentais e relacionadas com o próprio tráfego rodoviário, consideradas na aplicação do DG-QRAM que são susceptíveis de desadequação ao contexto rodoviário nacional, nomeadamente: taxas de ocupação de veículos, tráfegos de VPMP, velocidades de tráfego por categorias, tempos de paragem e atrasos em caso de congestionamento, frequências de acidentes para as várias categorias de veículos, densidade de população, análise de filas de trânsito,

probabilidades associadas à ocorrência de cada cenário, condições meteorológicas e tempos de evacuação do túnel.

- Integração da aplicação do DG-QRAM às recomendações, directrizes e procedimentos relevantes da protecção civil no que se refere ao transporte de matérias perigosas, para o que será necessária a coordenação com entidades como a Protecção Civil e outras instituições nacionais intervenientes.
- Alteração de parâmetros ou métodos de cálculo e definição de procedimentos necessários a um aperfeiçoamento ou alargamento dos resultados e dos casos abrangidos pelo DG-QRAM, designadamente no que se refere a acidentes não envolvendo VPMP. Apesar de ser um objectivo subsequente aos anteriores, as potencialidades associadas às PRA genéricas e a forma como a aplicação foi concebida pelo PIARC permitem encarar esta tarefa como sendo bastante atraente e sobretudo necessária a curto prazo.

As duas primeiras acções enunciadas constituem tarefas imperativas para o sucesso de qualquer actividade relacionada com a aplicação do método DG-QRAM. Somente após aquisição deste conhecimento, poderão futuras intervenções neste âmbito ser realizadas de forma segura, coesa e controlada. Com a realização das quatro acções obter-se-á uma base sólida de conhecimento que permita sustentar a intervenção do LNEC na disponibilização às entidades intervenientes dos meios para execução da componente de análise de risco dos projectos de infra-estruturas rodoviários em túnel.

Lisboa, LNEC, Julho de 2007

VISTOS



Eng.º António Lemonde de Macedo
Investigador Coordenador
Director do Departamento de Transportes

AUTORIAS



Carlos Lima de Azevedo
Bolsheiro de Investigação do LNEC



João Lourenço Cardoso
Investigador Principal
Chefe do Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança

6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMI F. (2006) - *Lectures for the HSCI 525 on Risk Analysis in Healthcare*. Course on Risk Analysis, October 2006. George Mason University, EUA 2006.
- BERND T. (2004) – *La nouvelle Directive 2004/54/CE relative à la sécurité des tunnels routiers*. ROADS 2004 nº 324, PIARC 2004.
- BIRKELAND P. W. (2002) - *Risk Analysis Methodology for Kistler's K-1 Reusable Launch Vehicle*. 34th COSPAR Scientific Assembly. The Second World Space Congress, October 2002, Houston TX, EUA 2002.
- BRADBURY J. (1989) – *The Policy Implications of Differing Concepts of Risk*. Science. Technology & Human Values, Vol. 14 nº4. 1989 Saige Publicatoins, Inc. 1989.
- BROEREN P. (2005) - *Optimizing Vertical Alignments - A Quantitative Approach to Cost-Effective Road Design for Tunnels*. 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, 2005.
- CARDOSO J. (2007) – *Métodos racionais de apoio à intervenção da engenharia em segurança rodoviária*. Programa de Investigação, LNEC, 2007.
- CASSINI P., DEUST C. (2007) – *Quantitative Risk Assessment Model for Dangerous Goods Transport through Road Tunnels*. INERIS Formation, Verneuil-en Halatte, France February 2007.
- CHANG SE S. M., MOORE J. - *Probabilistic Earthquake Scenarios: Extending Risk Analysis Methodologies to Spatially Distributed Systems*. Earthquake Spectra 2000.
- COHEN B. - *Probabilistic risk analysis for a high-level radioactive waste repository*. Risk Analysis October 2003.
- COMISSÃO DA UE (2001) – *Livro Branco – A política europeia de transportes no horizonte 2010: a hora das opções*. COM (2001) 370 final, Setembro de 2001.
- CROCKFORD N. (1986) - *An Introduction to Risk Management*. Second Edition, Woodhead-Faulkner. 0-85941-332-2, 1986.

- DECRETO-LEI nº 75/2006 (2006) – *Decreto-lei nº 75/2006 de 27 de Março de 2006*. Diário da Republica I Série A nº 61. Ministério das Obras Públicas. Transportes e Comunicações, Portugal 2006.
- DIRECTIVA 2004/54/CE (2004) – *Directiva 2004/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Abril de 2004*. Jornal Oficial da União Europeia L167, 2004.
- GARRICK B., KAPLAN S. (1999) – *A decision theory perspective on the disposal of high-level radioactive waste*. Risk Analysis October 1999.
- HADDEN S. G. (1984) – *Introduction: Risk policy in American Institutions*. Risk analysis, institutions and public policy. Port Washington, NY: Associated Faculty Press 1984.
- KATES R. e KASPERSON J. (1984) – *Comparative risk analysis of technological hazards (a review)*. Cented Reprint nº 46 Worcester, MA: Clark Technology Centre for Technology, Environment and Development 1984;
- KEEFEER D. (2001) – *Practice abstract*. Interfaces 31: 5, 2001.
- KHOL B., BOTSCHEK K., HÖRHAN R. (2007) – *Austrian risk analysis for road tunnels*. ITA-AITES World Tunnel Congress 2007 “Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises”, Czech Republic May 2007.
- KNOFLACHER H., HALL R., PONS P. (2006) – *Modèle d'évaluation quantitative du risqué pour le transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers*. ROUTES nº3329 Trimestriel 1 2006 Quarterly p. 86-93. PIARC 2006.
- KNOFLACHER H., PFAFFENBICHLER P. C. e NUSSBAUMER H. (2002) - *Quantitative Risk Assessment of Heavy Goods Vehicle Transport through Tunnels - the Tauerntunnel Case Study*. Institute for Transport Planning and Traffic Engineering, Vienna University of Technology. 1st International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 8-10 April 2002.
- MACEDO A. L. (2000) – *Sistemas de gestão da segurança rodoviária*. Teses e Programas de Investigação LNEC. LNEC, 2000.
- MAI S., ZIMMERMANN C. (2003) – *Risk Analysis-Tool for Integrated Coastal Planning*. Procedures of the 6th International Conference. on Coastal and Port Engineering 2003.
- MOLAG M., TRIJSSENAAR-BUHRE I. (2006) – *Risk assessment guidelines for tunnels*.

Second International Symposium, Lausanne 2006.

MOORE D., SAMPLE B., SUTER G., PARKHURST B., SCOTT T. (1999) – *A Probabilistic risk assessment of the effects of Methylmercury and PCBs on mink and Kingfishers along East Fork Poplar Creek, Oak Ridge, Tennessee, USA*. Environmental Toxicology and Chemistry 1999.

PIARC – *Risk Analysis for Road Tunnels – Draft Report*. Subgroup 2, Technical Committee 3.3., Work Group 2 “Management of road tunnel safety”.

SLOB W., PIETERS M. (1998) – *A probabilistic approach for deriving acceptable human intake limits and human health risks from toxicological studies: general framework*. Risk Analysis 1998.

TRIJSSENAAR-BUHRE I., KOCH W., WIERSMA T., RAMIREZ C. (2005) – *Current practice in tunnel safety*. D1 Report, Work package 1 “Current state of practice”, SafeT April 2005.

TRIJSSENAAR-BUHRE I., WIJNANT-TIMMERMAN S. (2004) – *Harmonised risk assessment*. D5.1 Report, Work package 5 “Harmonised risk assessment”, SafeT November 2004.

U.S. DEPT. OF DEFENSE (1987) – *Military standard, system safety program requirements*. MIL-STD-882B, Noticel 1987.

VOORTMAN G., VAN GELDER P., VRIJLING J. (2002) – *Risk-based design of large-scale flood defense systems*. 28th International Conference on Coastal Engineering, 2002.

ZIMMERMAN R. (1986) – *The management of risk*. Risk evaluation and management, ed. V.T. Covello, J. Menkes and J. Mumpower, 435-60. New York: Plenum 1986;

