



5.^{os} JORNINC

Jornadas de Segurança
aos Incêndios Urbanos

Lisboa • LNEC • 1 e 2 de junho de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



albrasci

Associação Lusobrasileira
para a Segurança contra Incêndio

CONTROLO DE FUMO POR MEIOS PASSIVOS EM TÚNEIS



João Carlos Viegas

Investigador
Principal
Laboratório Nacional
de Engenharia Civil
Portugal

SUMÁRIO

O controlo de fumo constitui um dos meios de mitigação do risco de incêndio que é correntemente utilizado para prolongar as condições ambientais compatíveis com a evacuação dos ocupantes e as condições ambientais favoráveis para a aproximação dos bombeiros ao incêndio e ao seu combate. Este estudo aponta para a possibilidade de ocorrer a contaminação da camada fria para distâncias a partir da fonte de calor inferiores a 400 m, quando se considera a geometria de uma galeria de duas vias de tráfego.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis, controlo de fumo, ventilação natural.

1. ENQUADRAMENTO

A Diretiva “Túneis” [1] obriga à adoção de ventilação mecânica para túneis de extensão superior a 1000 m. Por outro lado é genericamente aceite a nível internacional que túneis de extensão superior a 240 m/300 m podem necessitar de ventilação mecânica [2]. No decurso de um incêndio ventilado naturalmente, a estratificação térmica mantém o escoamento do fumo junto do teto, enquanto existe uma camada inferior de ar novo mais frio, na qual se deslocam os ocupantes e os bombeiros. O aspeto chave está relacionado com a possibilidade de se evitar a contaminação da camada fria pelo fumo enquanto a radiação térmica emitida pela camada quente não é excessivamente elevada. Constitui pois um problema de segurança e económico (se se puder evitar ventilação mecânica) do maior interesse conhecer os processos físicos que promovem a contaminação da camada fria com fumo em túneis até 1000 m de

extensão de modo a prever-se qual o comprimento máximo de túnel ainda compatível com controlo de fumo por meios passivos.

O problema da contaminação da camada fria com fumo deve ser analisado relativamente a três diferentes condições: (i) quando o túnel é completamente horizontal, (ii) quando o túnel tem um declive (em geral o declive dos túneis não excede 10% e, nos casos em que é devida conformidade à Diretiva [1], o declive não pode exceder 5%) e (iii) quando o vento gera um escoamento no interior que se opõe ao escoamento do fumo. Unicamente para o primeiro caso existe uma teoria (e ainda assim com insuficiências significativas), pois os trabalhos de investigação mais importantes foram desenvolvidos para o caso de corredores longos em edifícios [3], [4]. Todavia, a maior parte dos túneis tem declives que, mesmo sendo pequenos, alteram significativamente o escoamento do fumo e é sempre necessário considerar a possibilidade de existir vento com rumo desfavorável no momento da ocorrência de um incêndio. Para o caso de túneis inclinados, são conhecidos resultados experimentais relevantes obtidos para um modelo de um corredor em escala reduzida, para o qual o fluido de trabalho é a água salgada [4].

Neste estudo combinam-se os modelos analíticos conhecidos [3], [4] para se obter, numa primeira aproximação uma resposta à questão: “qual a distância a partir da qual é impossível manter a camada fria sem contaminação?” Note-se que estes resultados são muito sensíveis à modelação das perdas de calor na parede.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

A segurança contra incêndios de túneis com ventilação natural depende do padrão de escoamento do fumo. No caso dos túneis horizontais a hipótese de simetria longitudinal do escoamento é razoável. A pluma sobre a fonte de calor arrasta o ar novo da camada fria inferior até a base da camada quente. O caudal mássico de fumo está relacionado com a potência calorífica libertada e a altura da pluma [5] [6]. O ar novo escoar a partir dos emboquilhamentos do túnel através da camada fria. O escoamento de fumo constitui um jato teto, confinado pelas paredes do túnel, que escoar para os emboquilhamentos. Quando o fumo escoar ao longo do túnel, perde calor para o teto e para as paredes e arrefece. A velocidade do escoamento de fumo é devida à diferença de massa volúmica entre as camadas quente e fria. A velocidade do escoamento de fumo vai sendo reduzida, com o arrefecimento, ao longo do túnel. Existem três processos que podem causar a contaminação da camada fria com fumo: (i) a diferença de temperatura entre as camadas quente e fria é demasiado pequena e as velocidades (opostas) de ambas as camadas demasiado elevadas, causando a perda da estratificação térmica; (ii), devido à redução da velocidade da frente de fumo não é possível escoar na camada quente o caudal de fumo gerado na pluma térmica, como consequência algum fumo irá ser recirculado através da camada fria; (iii) a frente de fumo é misturada com ar frio, pelo que a sua espessura aumenta e pode ser uma fonte de contaminação camada fria.

O primeiro processo é bem conhecido e deve ocorrer quando o número de Richardson $Ri < 0,8$ [3] [7], em geral, este não é o processo crítico que leva à contaminação camada fria. No entanto, Yang et al. [7] verificaram que o padrão de estratificação para um escoamento gerado

pela impulsão num canal horizontal se insere em três regimes, dependendo dos Números de Richardson (Ri) e de Froude (Fr), mas não fazem distinção entre diferentes regiões do escoamento. Este aspeto encontra-se fora do âmbito deste estudo, pelo que deverá ser aprofundado em investigação futura.

O segundo processo (que se enquadra na classe dos escoamentos gravíticos com massa volúmica variável) não é totalmente conhecido mesmo para túneis horizontais e carece de investigação para túneis inclinados. Hinkley [3] desenvolveu uma teoria para corredores horizontais. Previu as perdas de calor do fumo ao longo do corredor, a velocidade do escoamento de fumo e a velocidade crítica (a velocidade que evitar “back-layering”), mas admitiu que a espessura máxima do escoamento de fumo corresponde a metade da altura do corredor e que a partir de uma certa distância longe da fonte de calor a massa volúmica do fumo é similar à massa volúmica do ar novo, hipótese que não é exata. Num trabalho mais recente, Hu, Huo e Chow [8] apresentaram dados experimentais que mostram que a espessura do escoamento de fumo se enquadra na gama de 19% -37% da altura do túnel, o que não concorda com a hipótese Hinkley [3]. No entanto, o objetivo da investigação conduzida por Hu, Huo e Chow [8] consistia na avaliação do comprimento de “back-layering” e a espessura do fumo pode estar ainda muito longe do início das condições de contaminação da camada fria.

Hu, Huo e Chow [8] também propuseram uma lei para a temperatura perto fonte de calor e para a variação de temperatura ao longo do túnel, bem como para a velocidade do escoamento de fumo, mas a velocidade adotada para o escoamento na camada fria está próxima da velocidade crítica e espera-se que a velocidade usualmente seja bastante inferior, mesmo com a ação do vento. Como resultado, estes fenômenos foram estudados perto da fonte de calor e para esta investigação é muito relevante adotar temperaturas mais baixas (que aumentam a possibilidade de perda de estratificação), que ocorrem muito longe da fonte de calor, e velocidades mais baixas. Nestas condições o trabalho de Hu, Huo e Chow [8] não é inteiramente aplicável ao caso em estudo. Existem outros estudos que referem a lei de variação da temperatura do fumo [9] [6] [10]; como esperado, a transferência de calor é reduzida progressivamente com o aquecimento do teto e das paredes, pelo que os coeficientes de transmissão de calor devem ser adaptados para o problema específico a ser estudado.

O terceiro processo não é suficientemente conhecido para as condições do túnel com a oposição ao escoamento de fumo devida ao vento. A maior parte do trabalho de investigação que foi desenvolvido sobre este assunto está relacionado com a velocidade crítica [11] [12] [13] [14] [15], pelo que pouca informação é relevante para o problema da desenfumagem natural de um túnel. Atkinson e Wu [16] estudaram o problema de “back-layering” em túneis inclinados. Os seus resultados são relevantes apenas para a previsão da velocidade crítica.

Torna-se claro que o problema dos limites à desenfumagem natural de túneis são ainda insuficientemente conhecidos, pelo que se justifica desenvolver investigação neste domínio. Como um primeiro passo, Utiliza-se nesta comunicação a informação existente para prever a distância a partir da fonte de calor para a qual ocorre a contaminação da camada fria ou a partir da qual a camada fria deixa de ter condições para a evacuação de pessoas desprotegidas, tendo em conta o segundo processo acima descrito.

3. METODOLOGIA

Neste estudo utiliza-se como referência o modelo analítico desenvolvido por Chan, Zukowski e Kubota [4]. O estudo desses autores tinha por objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico do escoamento do fumo num corredor longo, que se pode aqui assimilar a um túnel. O desenvolvimento do modelo numérico foi baseado em ensaios realizados em escala reduzida em que o fluido de trabalho foi a água salgada, sendo assim adiabático. Foi definida V_f^* a velocidade adimensional da frente do escoamento gravítico (“gravity current”, no léxico anglo-saxónico) de acordo com a expressão (1):

$$V_f^* = \frac{V_f}{\left(Qg \frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_a}\right)^{1/3}} \quad (1)$$

sendo V_f a velocidade da frente do escoamento gravítico, Q o caudal volúmico do escoamento gravítico por unidade de largura do túnel, g a aceleração da gravidade, ρ_w a massa volúmica do fluido de trabalho (o fumo) e ρ_a a massa volúmica do fluido ambiente. Constatou-se que nestes ensaios $V_f^* = 0,89 \pm 0,02$ para $Re > 1000$ e para canais horizontais, $V_f^* = 1,11 \pm 0,01$ para um canal de inclinação $\theta = 1^\circ$ e $V_f^* = 1,34 \pm 0,05$ para um canal de inclinação $\theta = 10^\circ$. Estes valores são aproximadamente constantes, exceto nas fases iniciais e finais do escoamento e não variam com o Número de Reynolds acima de $Re = 1000$. Note-se que a velocidade da frente do escoamento gravítico corresponde ao equilíbrio entre as forças gravíticas e as forças viscosas, devidas ao atrito com as paredes e fundo do canal (teto do túnel). O modelo numérico estabelecido por estes autores permitiu encontrar a velocidade da frente do escoamento gravítico num caso invíscido e para um canal horizontal de profundidade infinita, sendo $V_f^* = 1,2$. Note-se que o modelo numérico foi validado para o caso viscoso e com canal horizontal de profundidade finita, por comparação com os resultados experimentais, tendo sido verificado que o valor da velocidade da frente do escoamento do fumo obtida numericamente era cerca de 15% superior aos resultados experimentais. Embora estes resultados tenham sido obtidos apenas para o caso adiabático, verifica-se que a velocidade da frente do escoamento gravítico depende apenas de grandezas geométricas e das massas volúmicas do fluido ambiente e do fluido de trabalho. Assim, neste estudo exploratório, os resultados obtidos por Chan, Zukowski e Kubota [4] são utilizados em conjunto com outros modelos que permitem estimar a temperatura do fumo ao longo do túnel.

Na aplicação ao caso dos túneis, em que as diferenças de massa volúmica são devidas a diferenças de temperatura, é conveniente exprimir a equação (1) em termos da temperatura ambiente exterior T_∞ (admitindo, por simplificação, que o ar novo no interior do túnel tem a temperatura do ar exterior) e da temperatura local da camada quente (fumo) T . Considerando a equação dos gases perfeitos, a equação (1) pode então ser escrita na forma (2).

$$V_f^* = \frac{V_f}{\left(Qg \frac{T_\infty - T}{T}\right)^{1/3}} \quad (2)$$

O caudal volúmico de fumo por unidade de largura do túnel Q relaciona-se com a velocidade média do escoamento de fumo \bar{V} através da expressão $Q = h\bar{V}$, sendo h a espessura da camada de fumo (assumindo uma secção retangular). A velocidade da frente do fumo será superior à velocidade média do escoamento de fumo, devido ao atrito viscoso com as paredes e com o teto. Pode admitir-se que num escoamento completamente desenvolvido a velocidade da frente de fumo e a sua velocidade média são diretamente proporcionais, sendo C a constante de proporcionalidade, $\bar{V} = CV_f$. Assim, a equação (2) pode ser rescrita da forma (3).

$$V_f = V_f^{*3/2} \left(Chg \frac{T_\infty - T}{T} \right)^{1/2} \quad (3)$$

O problema seguinte consiste na estimativa da temperatura do fumo em cada secção do túnel à distância x da fonte de calor. No âmbito deste estudo foi adotada a expressão (4), derivada por Hu, Huo e Chow [8] com base numa equação empírica proposta por Kurioka [17], sendo Q' a potência calorífica libertada adimensional, dada pela expressão (5), e Fr o Número de Froude, dado pela expressão (6).

$$T_x - T_\infty = T_\infty \cdot \gamma \left(\frac{Q'^{2/3}}{Fr^{1/3}} \right)^\varepsilon \cdot e^{-0,019x} \quad (4)$$

$$Q' = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2} H_d^{5/2}} \quad (5)$$

$$Fr = \frac{v^2}{gH_d} \quad (6)$$

Os parâmetros γ e ε assumem os valores $\gamma = 1,77$ e $\varepsilon = 6/5$ se $Q'^{2/3}/Fr^{1/3} < 1,35$ e $\gamma = 2,54$ e $\varepsilon = 0$ se $Q'^{2/3}/Fr^{1/3} \geq 1,35$. As restantes variáveis têm o seguinte significado: \dot{Q}_c é a potência calorífica convectada, ρ_∞ é a massa volúmica do ar à temperatura ambiente T_∞ , C_p é o calor específico a pressão constante do ar à temperatura T_∞ , g é a aceleração da gravidade, H_d é a altura desde a superfície do fogo até ao teto do túnel e v é a velocidade do escoamento.

O caudal mássico de fumo \dot{m}_s foi estimado de acordo com Cafaro e Bertola [6], através da expressão (7), sendo \dot{Q}_c a potência calorífica convectada e z a altura da pluma.

$$\dot{m}_s = 0,71 \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3} \left(1 + 0,026 \dot{Q}_c^{2/3} z^{-5/3} \right) \quad (7)$$

Na análise subsequente admite-se que a condição limite para o início da contaminação da camada fria é a estabelecida por Hinkley [3], correspondendo metade da altura do túnel, no caso de túnel horizontal. Para além disso vai ser admitido que a velocidade da frente de fumo é similar à velocidade média do fumo ($C=1$). Analisa-se a tendência para a perda de estratificação térmica ao longo de um túnel para potência calorífica libertada variando entre

1 MW e 200 MW e para túneis horizontais e túneis com a inclinação de 5% (valor máximo de inclinação admitido pela Diretiva [1]). No caso do túnel horizontal admitiu-se que o caudal de fumo se reparte igualmente pelos dois emboquilhamentos do túnel.

No caso do túnel com a inclinação de 5% admitiu-se que o fumo escoava totalmente pelo emboquilhamento a cota mais elevada. Neste caso, a admissão de ar novo para a fonte de calor pode ser feita através emboquilhamento inferior, pelo que a contaminação local com fumo da camada fria subjacente à de fumo não gera necessariamente arrastamento de fumo através da camada fria em direção à fonte de calor. Assim, a condição limite de evacuação que se considera neste estudo para o túnel inclinado corresponde à cota do interface entre o fumo e a camada fria subjacente atingir a cota limite de 2,5 m, abaixo da qual se considerou impeditivo da evacuação de pessoas desprotegidas. Desta forma esta condição limite é diferente da condição limite para os túneis horizontais, pois enquanto nesses a contaminação local da camada fria acarreta a sua contaminação global, porque o fumo é arrastado pelo escoamento do ar novo, nos túneis inclinados a contaminação poderá ser apenas local se a origem de todo o ar novo for o emboquilhamento inferior.

Este estudo foi particularizado para um túnel com 7,5 m de altura e 12,1 m de largura, que corresponde tipicamente a uma galeria unidirecional com duas vias para tráfego, uma berma com a função de via de paragem de emergência e uma pequena berma do lado esquerdo. Esta geometria é corrente para um túnel de autoestrada. Admitiu-se que a secção reta do túnel é retangular.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram analisados os casos de túnel horizontal com a velocidade adimensional da frente de fumo $V_f^* = 0,89$, conforme os resultados obtidos para os ensaios com água salgada [4] (designa-se nas figuras como “Água salgada 0%”), e com $V_f^* = 1,2$, conforme os resultados obtidos através de simulação para um escoamento invíscido através de um canal de largura e profundidade infinitas [4] (designa-se nas figuras como “Invíscido”). Foi também analisado o caso de túnel com o declive de 5% com a velocidade adimensional da frente de fumo $V_f^* = 1,15$, obtido por interpolação a partir dos valores de $V_f^* = 1,11$ (para um canal de inclinação $\theta = 1^\circ$) e $V_f^* = 1,34$ (para um canal de inclinação $\theta = 10^\circ$), conforme os resultados obtidos para os ensaios com água salgada [4] (designa-se nas figuras como “Água salgada 5%”). Na figura 1 são apresentados os resultados obtidos para a distância (que se passa a designar por “distância crítica”, por simplicidade de linguagem) para a qual a espessura do fumo atinge metade da altura do túnel, para o caso horizontal, e a cota de 2,5 m, para o caso inclinado. Na figura 2 apresenta-se o tempo (que se passa a designar por “tempo crítico”, por simplicidade de linguagem) que demora até ser atingida uma dessas condições.

Observa-se que as distâncias críticas estão compreendidas entre 385 m e 415 m para o escoamento invíscido e estão compreendidas entre 335 m e 365 m para os restantes casos. Quando a potência calorífica libertada é baixa a velocidade do escoamento é mais baixa e a espessura da camada de fumo cresce mais depressa com a distância. Quando a potência calorífica é muito elevada o caudal de fumo também é muito elevado, pelo que a espessura da

camada de fumo atinge mais facilmente as cotas limite. As maiores distâncias críticas ocorrem para valores intermédios da potência calorífica libertada, que neste caso correspondem ao intervalo compreendido entre 60 MW e 90 MW. Dado que se desconhece o cenário de incêndio que irá ocorrer, deve tomar-se o limite inferior como a distância crítica de referência, ou seja 385 m para o caso invíscido e 335 m para os restantes casos. Verifica-se que estes resultados são sensíveis à quantificação das perdas de calor com a envolvente; se as perdas de calor forem menos intensas, a diferença de temperatura entre a camada de fumo e a camada fria é mais importante, pelo que a velocidade da frente de fumo é mais elevada, o que terá implicações na distância crítica. Os valores aqui considerados correspondem ao princípio de incêndio, fase na qual as paredes do túnel ainda não aqueceram significativamente. Esta é a fase relevante uma vez que o que vai condicionar a evacuação é o início do fenómeno de contaminação da camada fria.

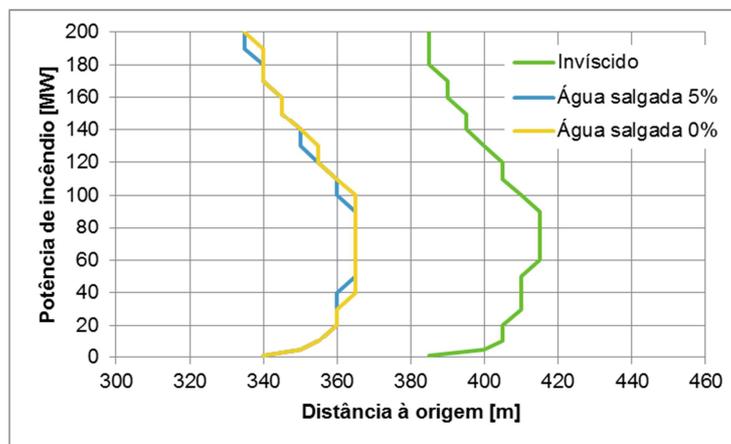


Figura 1: Distância crítica

Recorda-se que a diferença que ocorre nos dois casos de túnel horizontal consiste na existência ($V_f^* = 0,89$ obtido para água salgada) ou não ($V_f^* = 1,2$ obtido para o caso invíscido) de tensões de corte de origem viscosa (devidas ao atrito com o teto e paredes) que reduzem a velocidade da frente de fumo. Para além disso, o modelo numérico que foi utilizado para a estimativa da velocidade adimensional da frente de fumo no escoamento invíscido sobrestima esses valores. O caso real de um túnel rodoviário deverá ter efeitos viscosos intermédios, embora mais próximos do caso invíscido do que o de água salgada. Assim, é de esperar que a distância crítica no túnel horizontal tenha um valor significativamente inferior a 385 m.

Dado que o acidente que gera o incêndio pode impedir a circulação automóvel dentro do túnel, deve admitir-se que de um dos lados (se a galeria do túnel for unidirecional) ou, eventualmente, de ambos os lados da fonte de calor (se o túnel for bidirecional ou, mesmo sendo uma galeria unidirecional, se houver trânsito congestionado) poderá haver utilizadores retidos. Uma vez que o incêndio pode ocorrer na proximidade de um emboquilhamento e na ausência de vento (que irá alterar as condições de simetria que aqui foram consideradas), é de esperar que para túneis da ordem de 350/400 m possa ocorrer o fenómeno de contaminação total da camada fria (em túneis horizontais). É também expectável que a existência de vento contrário venha a reduzir a

velocidade do escoamento da frente de fumo e, assim, a encurtar a distância crítica; todavia, desconhecem-se estudos que quantifiquem este efeito.

No caso de túneis com a inclinação de 5%, a distância crítica obtida será conservativa, uma vez que a velocidade adimensional da frente de fumo considerada inclui efeitos viscosos mais importantes que os esperados nos túneis rodoviários. Ainda assim, enquanto não houver outra informação mais ajustada, parece ser sensato a utilização da distância crítica de 335 m como referência. Também aqui a existência de vento em sentido contrário terá potencial para a redução da distância crítica.

Note-se que estes problemas podem ser ultrapassados através da utilização de sistemas ativos de controlo de fumo em caso de incêndio, pelo que o que se discute aqui é apenas qual o comprimento de um túnel, ou de uma galeria de túnel, compatível com o escoamento natural do fumo para o exterior. Consta-se que a Diretiva [1] só obriga ao recurso a meios ativos de ventilação e de controlo de fumo para túneis de comprimento superior a 1000 m. Esta exigência pode dar a ideia (embora nada na Diretiva [1] permita inferir isso) de que para comprimentos inferiores a 1000 m é dispensável a utilização de meios ativos de controlo de fumo. Os resultados apresentados nesta comunicação suportam a posição de que um comprimento de túnel de 240/305 m (tal como referenciado na regulamentação francesa [18] e em anterior e atual normalização americana [2] [19] constitui um limite de salvaguarda a não ultrapassar.

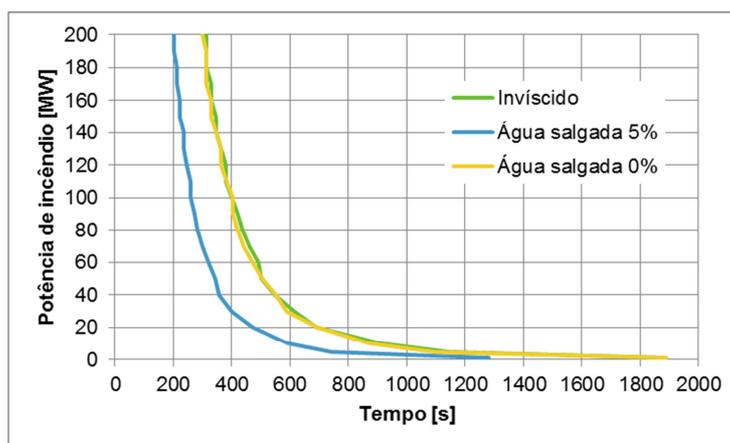


Figura 2: Tempo crítico

Na figura 2 constata-se que o tempo disponível para a evacuação até serem atingidas as condições críticas de contaminação da camada fria se reduz com o incremento da potência calorífica libertada, uma vez que a velocidade da frente de fumo cresce com a potência. Considerando, a título de exemplo, a velocidade de deslocamento de pessoas a pé em situação de emergência referenciada na norma NFPA 130 [19], que é de 61,0 m/min, para zonas de baixa densidade de ocupação. Consta-se que o tempo de trânsito de evacuação passa a ser superior ao tempo crítico para a potência calorífica libertada de 140 MW (distância de 350 m), para o caso de túnel horizontal e escoamento viscoso (água salgada), de 50 MW

(distância de 365 m), para o caso de túnel com inclinação de 5% e escoamento viscoso (água salgada, não se considera aqui agravamento de tempo pelo facto do caminho ser ascendente), e de 100 MW (distância de 410 m), para o caso de túnel horizontal e escoamento invíscido. Note-se que aqui não foi considerado o tempo de deteção de incêndio, o tempo de aviso aos utilizadores (alarme) e o tempo que os utilizadores levam a consciencializar-se do perigo que correm e a iniciarem a sua evacuação; se, a título de exemplo, se considerar a soma destes tempos como tendo o valor total de 120 s, constata-se que o tempo total de evacuação passa a ser superior ao tempo crítico para a potência calorífica libertada de 60 MW (distância de 365 m), para o caso de túnel horizontal e escoamento viscoso (água salgada), de 20 MW (distância de 360 m), para o caso de túnel com inclinação de 5% e escoamento viscoso (água salgada, não se considera aqui agravamento de tempo pelo facto do caminho ser ascendente), e de 50 MW (distância de 410 m), para o caso de túnel horizontal e escoamento invíscido. Note-se que os valores de potência calorífica libertada compreendidos entre 20 MW e 60 MW são característicos de incêndios em veículos pesados, pelo que são passíveis de ocorrer em túneis sem limitação de trânsito a pesados. Constatase que, também para se assegurar a possibilidade de evacuação dos utilizadores, pode ser necessário ter distâncias de evacuação curtas (eventualmente asseguradas por vias de evacuação dedicadas).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apontam para a ocorrência de contaminação da camada fria para uma distância a partir da fonte de calor compreendida entre 335 m e 415 m quando o túnel é horizontal e para potências da fonte de calor compreendidas entre 1 MW e 200 MW, considerando-se, neste caso que o escoamento do fumo ocorre simultaneamente para ambos os emboquilhamentos (na ausência de vento). No caso de um túnel com o declive de 5%, sem vento e para o qual se admite que o escoamento do fumo ocorre apenas para o emboquilhamento de cota mais elevada, os resultados obtidos apontam para a contaminação da camada fria ocorrer a uma distância a partir da fonte de calor compreendida entre 335 m e 365 m (também para potências da fonte de calor compreendidas entre 1 MW e 200 MW). Note-se que estes resultados são sensíveis à modelação das perdas de calor na parede.

Estes resultados apontam para a existência de riscos potenciais em situação de incêndio em túneis com comprimento superior a 335 m que não sejam dotados de meios ativos para controlo de fumo. Este estudo salienta a existência de vários aspetos que requerem estudo mais aprofundado para se poder avaliar com rigor a segurança dos túneis sem controlo de fumo por meios ativos

REFERÊNCIAS

- [1] *Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network.*
- [2] *NFPA 502: 2011 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways.* National Fire Protection Association, Quincy (USA).

- [3] Hinkley P. L. - *The flow of hot gases along an enclosed shopping mall. A tentative theory.* 1970.
- [4] Chan W.R., Zukowski E.E. & Kubota T. – *Experimental and numerical studies on two-dimensional gravity currents in a horizontal channel.* Report NIST-GCR-93-630. California Institute of technology, Pasadena, 1992.
- [5] *NFPA 92: 2015. Standard for Smoke Control Systems.* National Fire Protection Association, Quincy (USA).
- [6] Cafaro E., Bertola V. - *Fires in Tunnels: Experiments and Modelling.* The Open Thermodynamics Journal, 2010, 4, p. 156-166.
- [7] Yang D., Hu L.H., Huo R., Jiang Y.Q., Liu S., Tang F. - *Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel.* Applied Thermal Engineering 30, 2010, p. 872–878.
- [8] Hu L.H., Huo R., Chow W.K. - *Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires.* Experimental Thermal and Fluid Science 32, 2008, p. 1468–1483.
- [9] Hu L.H., Huo R., Wang H.B., Li Y.Z., Yang R.X. - *Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling.* Building and Environment 42, 2007, p. 3905–3915.
- [10] Bailey J.L., Forney G.P., Tatem P.A., Jones W.W. – *Development and validation of corridor flow submodel for CFAST.* Journal of Fire Protection Engineering, 12, 2002.
- [11] Brahim K., Mourad B., Afif E. C., Ali B. - *Control of Smoke Flow in a Tunnel.* Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 49-60.
- [12] Koslowski C, Motevalli V. - *Behavior of a 2-dimensional ceiling jet flow: a beamed ceiling configuration.* In: Kashiwagi T, editor. Proceedings of the Fourth international Symposium on fire safety science. Bethesda, MD: International Association of Fire Safety Science; 1994. p. 469.
- [13] Oka, Y. and Atkinson, G.T. - *Control of smoke flow in tunnel fire.* Fire Safety Journal, 25, 1995, p. 305-322.
- [14] Wu, Y. and Bakar, M.Z.A. - *Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity.* Fire Safety Journal, 35, 2000, p. 363–390.
- [15] Kunsch, J.P. - *Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel.* Atmospheric Environment, 33, 1999, p. 13–24.
- [16] Atkinson G.T., Wu Y. - *Smoke Control in Sloping Tunnels.* Fire Safety Journal 27, 1996, p. 335-341.
- [17] Kurioka H., Oka Y., Satoh H., Sugawa O. - *Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels,* Fire Safety Journal 38, 2003, p. 319–340.
- [18] *Circulaire Interministerielle N° 2000- 63 du 25 Aout 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national.*
- [19] *NFPA 130: 2014 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.* National Fire Protection Association, Quincy (USA).