

IMPACTE DAS DIFERENÇAS DE PRESSÃO GERADAS PELO CONTROLO DE FUMO EM TÚNEIS



João Viegas¹
Invest. Principal
LNEC - Lisboa



Oliveira Costa
Invest. Principal
LNEC - Lisboa



Bernardo Monteiro
Geólogo
IP - Almada



Paulo Pereira
Eng. Informático
SCUTVIAS

SUMÁRIO

Os túneis rodoviários longos dotados de duas galerias unidireccionais independentes são normalmente dotados de ventilação longitudinal. Este esquema de ventilação, quando aplicado ao controlo do fumo, pode gerar diferenças de pressão significativas entre ambas as galerias rodoviárias, o que pode ter impacto na utilização das galerias transversais do túnel. Nesta comunicação são apresentados resultados de medições dessas diferenças de pressão em túneis que serviram de referência experimental para validar um modelo analítico de previsão do escoamento em túneis. É realizada uma análise de sensibilidade desse modelo que permite evidenciar o impacte que essas diferenças de pressão podem ter na utilização das galerias transversais.

PALAVRAS-CHAVE: túneis; controlo de fumo; pressões.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao risco de incêndio em túneis, constitui uma prática habitual implementar sistemas de controlo de fumo com a finalidade de contribuírem para a mitigação do risco de incêndio. Com frequência é utilizado o esquema de ventilação longitudinal, que se baseia correntemente na colocação de ventiladores de impulso, de grandes dimensões, suspensos sob a abóbada do túnel. Este esquema de controlo de fumo é aplicado em túneis com galerias rodoviárias unidireccionais e sem congestionamento de tráfego frequente. Baseia-se no princípio de que o cenário de incêndio pode impossibilitar a passagem dos veículos, retendo-os a montante do acidente. Assim, para evitar a exposição dos ocupantes dos veículos retidos no túnel ao fumo, criam-se condições para que todo o caudal de fumo escoe no sentido do tráfego. Admite-se, como é natural, que todos os veículos que, na altura do acidente, se encontravam a jusante do local do acidente prosseguiram a sua marcha e, em devido tempo saíram do túnel.

Neste esquema de controlo de fumo pretende-se impor uma velocidade longitudinal, no sentido do tráfego, superior à velocidade crítica, sendo esta a velocidade que o escoamento do fumo proveniente de um incêndio poderá atingir no sentido contrário ao do tráfego [1]. Estes sistemas têm de ser dimensionados de modo a ter em conta a ação do vento com rumo desfavorável, a resistência aerodinâmica produzida pelos veículos imobilizados

¹Autor correspondente – Lab. Nacional de Engenharia Civil, Centro de Instrumentação Científica, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
email: jviegas@lnec.pt <http://www.lnec.pt>

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
Las Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

(quando relevante), o efeito de chaminé (quando a sua ação se opõe ao escoamento previsto para o fumo), a perda de carga induzida pela própria fonte de calor, bem como todas as perdas de carga triviais que ocorrem em escoamentos em condutas (na entrada, na saída e ao longo do túnel [2]. Em túneis rodoviários, dependendo da tipologia do tráfego, a potência calorífica considerada para os cenários de incêndio de referência varia normalmente entre 15 MW e 100 MW [3]. Em túneis mais recentes, como por exemplo o Túnel do Marão, tem sido habitual adotar cenários de incêndio de potência mais elevada fruto dos desenvolvimentos mais recentes do conhecimento internacional sobre o assunto.

Para potências elevadas a velocidade crítica pode situar-se entre 2 m/s e 3 m/s. Em túneis mais longos tais velocidades criam variações de pressão significativas ao longo de cada galeria rodoviária. Também neste caso de túneis longos a galeria não sinistrada é utilizada como via de evacuação do túnel e como potencial acesso de emergência. Para isso devem existir galerias transversais ligando as duas galerias rodoviárias a distâncias não superiores a 500 m. Estas galerias transversais põem em comunicação entre si as galerias rodoviárias em pontos onde podem existir diferenças de pressão importantes entre estas, diferenças de pressão que, caso nada seja feito, podem promover escoamentos entre galerias rodoviárias. Para mitigar os inconvenientes destas diferenças de pressão, as galerias transversais são normalmente dotadas de portas corta-fogo e também de sistemas de controlo de fumo por pressurização.

É ainda limitada a publicação de resultados de medição de velocidades do escoamento e do impulso em túneis, bem como da determinação experimental das características aerodinâmicas de túneis. Bring, Malmström e Boman [4] desenvolveram um modelo de previsão da pressão do ar, dos caudais escoados e da concentração de poluentes; o programa foi validado através da comparação com programas mais antigos; procederam ainda à medição de caudais de ar, recorrendo ao uso de gases traçadores, num túnel rodoviário de Estocolmo. Janga e Chen [5] propuseram uma metodologia para a medição simultânea do coeficiente de atrito na parede do túnel, do coeficiente aerodinâmico de arrastamento de veículos e do incremento de pressão causado pelo funcionamento dos ventiladores de impulso. A metodologia baseia-se na contagem do tráfego e na medição da velocidade induzida pelo efeito de pistão dos veículos no Túnel de Fu-De (de 1800 m de extensão), nos arredores de Taipé. Concluíram que o fator de atrito é de $f=0,026$ e que o coeficiente de instalação dos ventiladores de impulso é de $k=0,56$ (este coeficiente expressa as perdas irreversíveis que ocorrem por atrito com a abóbada, paredes e piso do túnel nas zonas de contacto do jato produzido pelo ventilador de impulso, ver equação 1). Steinemann e Zumsteg [6] realizaram medições de velocidade do escoamento e da temperatura no Túnel Gotschna e medições da diferença de pressão entre os portais e de temperatura no Túnel rodoviário de Gotthard. Os valores medidos no Túnel Gotschna foram relacionados com a temperatura exterior. Collela et al. [7] realizaram medições da velocidade do escoamento no Túnel Dartford West, em Londres. Tong *et al.* [8] realizaram medições de velocidade do escoamento e da concentração de CO em cinco túneis na China e desenvolveram um modelo teórico do escoamento que validaram por comparação com as medições realizadas no Túnel de Xianmen. Levoni *et al.* [9] realizaram medições da velocidade do escoamento em diversas secções do Túnel do Monte Branco e estimaram as perdas de carga nas aberturas através de simulações computacionais CFD. Com estes elementos fizeram o ajustamento de um modelo unidirecional, permitindo a estimativa das características aerodinâmicas do túnel. Santos, Saraiva e Rodrigues [10] propuseram uma metodologia para estimativa da velocidade média do escoamento na secção do túnel tendo por base um número limitado de medições. Viegas [11] propôs uma metodologia de estimativa da incerteza da velocidade média do escoamento em túneis, baseada na realização de um número limitado de medições de velocidade. Em nenhum destes trabalhos são utilizadas as galerias transversais entre galerias rodoviárias para se medirem diretamente as diferenças de pressão entre estas últimas, pelo que o estudo que aqui se apresenta se afigura constituir uma aproximação inovadora.

Tendo em vista a análise do impacte destas diferenças de pressão na proteção das vias de evacuação, foram realizadas medições das diferenças de pressão em dois túneis rodoviários, no Túnel do Marão e no Túnel da Gardunha. A comparação dos resultados experimentais com o cálculo analítico do escoamento no túnel permitiu estimar com maior rigor grandezas tais como o coeficiente de perda de carga de entrada, o fator de atrito no túnel e o coeficiente de instalação dos ventiladores de impulso.

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

Nesta comunicação é descrito o processo experimental utilizado, é realizada uma análise de sensibilidade às condições do incêndio com base no modelo analítico validado experimentalmente e é analisado o impacto das diferenças de pressão na segurança da utilização das galerias transversais.

2. DESCRIÇÃO DOS TÚNEIS

O Túnel do Marão, que atravessa a Serra do Marão entre Amarante e Vila Real, tem uma extensão nominal de 5680 m e tem um declive longitudinal máximo de 2,5 % (pendente ascendente no sentido de Amarante para Vila Real). O túnel tem declive variável na proximidade do emboquilhamento nascente. Para efeitos do estudo do sistema de ventilação e de controlo de fumo é essencialmente relevante a diferença de nível entre os emboquilhamentos, que é de 135 m (correspondendo a um declive médio de 2,38%). O túnel tem uma secção transversal de 74,6 m². Existem 13 ligações entre as galerias rodoviárias com função de saída de emergência, com afastamentos entre si de cerca de 400 m, 7 das quais servindo apenas para a evacuação de peões e 6 para a evacuação de peões e para passagem de veículos de emergência. Todas elas estão munidas de portas corta-fogo e de meios ativos de controlo do fumo.

Os sistemas de ventilação instalados nas duas galerias têm características diversas. No caso da galeria oeste-este (ascendente), são utilizados 8 ventiladores de impulso de 769 N, instalados em 4 grupos de 2 ventiladores, e 6 ventiladores de impulso bidirecionais de 808 N, instalados em 3 grupos de 2 ventiladores. No caso da galeria este-oeste (descendente), são utilizados 26 ventiladores de impulso de 769 N, instalados em 13 grupos de 2 ventiladores, e 6 ventiladores de impulso bidirecionais de 808 N, instalados em 6 grupos de 2 ventiladores. Os ventiladores de impulso são todos do tipo “banana jet”, que asseguram menores perdas por atrito do jato no teto. Devido à sua forma, com os eixos dos atenuadores acústicos desalinados, estes ventiladores geram velocidades junto do teto mais baixas do que as velocidades que ocorrem nos campos gerados por ventiladores correntes (de eixos alinhados). Por essa razão as perdas por atrito são mais baixas, conduzindo a um coeficiente de instalação mais elevado. Assim, ao ventilador, do tipo “banana jet”, com o impulso nominal de 769 N corresponde, de acordo com o fabricante, a um impulso nominal de 1000 N de um ventilador corrente e ao ventilador, do tipo “banana jet”, com o impulso nominal de 808 N corresponde, também de acordo com o fabricante, um impulso nominal de 1050 N de um ventilador corrente. Cada ventilador de 769 N de impulso tem 1,00 m de diâmetro e uma velocidade na descarga de 29,3 m/s. Cada ventilador de 808 N de impulso tem 1,00 m de diâmetro e uma velocidade na descarga de 30,8 m/s. As características de desempenho destes ventiladores foram confirmadas através de ensaio realizado em fábrica, seguindo a metodologia especificada na norma ISO 13350 [12].

No Túnel da Gardunha, que atravessa a Serra da Gardunha entre Alpedrinha e Fundão, galeria rodoviária sul-norte tem uma extensão de 1620 m e a galeria rodoviária norte-sul tem uma extensão de 1570 m. O declive do túnel é de 1,7%, correspondendo a um desnível entre portais de cerca de 27 m e sendo descendente no sentido sul-norte. A secção transversal do túnel é de 62 m². Com função de saída de emergência, existem 5 galerias transversais de ligação entre as galerias rodoviárias, distando entre si menos de 300 m, das quais quatro são para evacuação de pessoas e uma é para veículos e pessoas. As galerias pedonais encontram-se protegidas por portas corta-fogo.

A galeria rodoviária norte-sul tem atualmente um sistema de ventilação longitudinal baseado na instalação de 9 ventiladores axiais reversíveis de impulso suspensos no teto, aproximadamente equidistantes entre si. Cada ventilador tem 1,25 m de diâmetro, desenvolve, nas condições ambientais normais, um impulso nominal de 1058 N e tem uma velocidade na descarga de 26,5 m/s. A galeria rodoviária sul-norte tem um sistema de ventilação longitudinal baseado na instalação de 6 ventiladores axiais (reversíveis) de impulso suspensos no teto, que desenvolvem (nas condições ambientais normais) um impulso nominal de 900 N e têm uma velocidade na descarga de aproximadamente 26,7 m/s, e de outros 7 ventiladores de impulso idênticos aos da galeria norte-sul.

No âmbito desta comunicação, apenas os sistemas de controlo de fumo das galerias descendentes serão analisados.

3. METODOLOGIA

O escoamento do ar no interior de um túnel é similar ao escoamento de um fluido numa conduta e é caracterizado por um conjunto de parâmetros, nomeadamente os coeficientes de perda de carga nos emboquilhamentos do túnel, o fator de atrito médio no interior do túnel e o coeficiente de instalação dos ventiladores de impulso. Estes valores são escolhidos na fase de projeto com base no conhecimento adquirido e nas práticas consagradas de projeto.

Este escoamento pode ser modelado recorrendo a uma generalização da equação de Bernoulli na qual são incluídos termos específicos para túneis [2]. Nesta equação todas as forças aerodinâmicas resistentes, no caso de escoamentos completamente turbulentos, são diretamente proporcionais à pressão dinâmica do escoamento. A expressão (1) apresenta esta igualdade, em que o primeiro termo do primeiro membro representa a ação do vento, o segundo termo o efeito de chaminé, o terceiro termo o efeito de pistão e o quarto termo a diferença de pressão gerada pelos ventiladores de impulso no interior do túnel. O primeiro termo do segundo membro representa a perda de carga ao longo da galeria do túnel, o segundo termo as perdas de carga singulares (nos emboquilhamentos de entrada e de saída) e o terceiro termo a perda de carga que ocorre no local do incêndio, sendo ξ o coeficiente de perda de carga, \bar{V}_{va} a velocidade média do escoamento no interior da galeria do túnel, ρ a massa volúmica do ar à temperatura interior do túnel, f o fator de atrito, D_H o diâmetro hidráulico, c um coeficiente empírico com o valor de $1,8 \times 10^{-5}$ e \dot{Q}_c a potência calorífica convectada. Nesta equação δ_{p1} e δ_{p2} representam os coeficientes de pressão do vento nos portais, ρ_0 é a massa volúmica do ar à temperatura exterior, \bar{V}_v é a velocidade média do vento, γ é a pendente do túnel, g é a aceleração da gravidade, L é o comprimento do túnel, $C_x \Sigma$ é o coeficiente de arrastamento aerodinâmico do veículo, Σ é a sua área frontal, S é a secção do túnel, U é a velocidade de deslocamento do veículo (considera-se normalmente o caso mais desfavorável correspondendo à velocidade máxima permitida no túnel), k é o coeficiente de instalação dos ventiladores de impulso F_0 é o impulso desenvolvido pelos ventiladores em condições de laboratório, ρ_{Lab} é a massa volúmica do ar durante o ensaio de qualificação do desempenho dos ventiladores em laboratório e \bar{V}_{imu} é a velocidade média do ar à saída dos ventiladores de impulso.

$$\frac{1}{2}(\delta_{p1} - \delta_{p2})\rho_0\bar{V}_v |\bar{V}_v| + \gamma(\rho_0 - \rho)gL + \frac{1}{2} \frac{C_x \Sigma}{S} \rho(U - \bar{V}_{va})|U - \bar{V}_{va}| + k \frac{F_0}{S} \frac{\rho}{\rho_{Lab}} \left(1 - \frac{\bar{V}_{va}}{\bar{V}_{imp}}\right) =$$

$$= f \frac{\rho \bar{V}_{va}^2 L}{2 D_H} + \frac{1}{2} \xi \rho \bar{V}_{va}^2 + c \frac{\dot{Q}_c}{\bar{V}_{va} D_H^2} \quad (1)$$

Em ambos os túneis, as galerias de interligação põem em comunicação as duas galerias rodoviárias. Foi utilizada esta característica construtiva para a realização da medição da diferença de pressão que ocorre entre as duas galerias rodoviárias quando o sistema de ventilação se encontra em funcionamento e, assim, determinar os ganhos de carga devidos ao funcionamento dos ventiladores e as perdas de carga existentes no interior de cada túnel. A metodologia adotada foi a seguinte:

- a) Considera-se que as ações naturais que geram escoamentos no interior do túnel são similares nas duas galerias rodoviárias, pelo que as diferenças de pressão que são estabelecidas entre elas durante estas medições são devidas exclusivamente à ação da ventilação mecânica ativa. Por essa razão, nesta aplicação não é necessário considerar na modelação o primeiro e o terceiro termos do primeiro membro da equação (1).
- b) Foram ativados todos os ventiladores de impulso existentes na galeria descendente de cada túnel (32 ventiladores no caso da galeria Vila Real – Amaranate do Túnel do Marão e 13 ventiladores no caso da galeria Alpedrinha – Fundão do Túnel da Gardunha) e mantidos inativos os ventiladores da galeria ascendente.
- c) Foi realizada a medição da diferença de pressão entre as duas galerias rodoviárias através de cada galeria de interligação. Foi medida, em simultâneo, a velocidade pontual do escoamento e extrapolada para a velocidade média, com base em resultados obtidos em medições precedentes realizadas nesses túneis (pode consultar-se a metodologia em [11]).
- d) Foi desenvolvido um modelo unidimensional de um escoamento em conduta, baseado na aplicação da Equação de Bernoulli generalizada, apresentado na equação (1). Para a constituição deste modelo foi

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

seguida a metodologia especificada em [2]. Para a aplicação deste modelo, cada túnel foi subdividido em troços elementares de 10 m, nos quais as características do escoamento são consideradas constantes.

- e) Ajustamento da curva de pressão estática ao longo da galeria rodoviária, que foi objeto de ensaio, aos resultados experimentais pelo método dos mínimos quadrados, sendo variáveis a otimizar o fator de atrito da galeria rodoviária que foi objeto de ensaio, os coeficientes de perda de carga de entrada, de saída e o coeficiente de instalação dos ventiladores de impulso.
- f) Comparação com os resultados obtidos através da medição de velocidade com diferente número de ventiladores de impulso ativos e compatibilização dos resultados.
- g) Inserção no modelo de cada túnel de uma fonte de calor correspondente ao incêndio de referência (30 MW no caso do Túnel da Gardunha e 70 MW no caso do Túnel do Marão) em diferentes localizações e análise das diferenças de pressão obtidas em cada simulação entre as galerias rodoviárias descendente (com o sistema de controlo de fumo ativo) e ascendente (sem o sistema de controlo de fumo ativo).

Neste estudo foram apenas realizadas medições com a ventilação ativa nas galerias descendentes uma vez que estas dispõem de sistemas de controlo de fumo com impulso superior aos das galerias ascendentes. Assim, é estudado o caso em que as diferenças de pressão entre galerias é maximizado. Saliencia-se que, embora neste estudo apenas se considere ativo o sistema de controlo de fumo das galerias descendentes, efetivamente, em situação de incêndio, existirá um certo número de ventiladores de impulso também ativos nas galerias ascendentes, com a finalidade de evitar a contaminação destas com fumo por via do emboquilhamento de entrada. O efeito destes ventiladores será gerar pressões negativas a montante da sua localização e pressões positivas a jusante desta.

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Os resultados obtidos na medição da diferença de pressão entre as duas galerias rodoviárias com o sistema de ventilação ativo na galeria descendente e inativo na outra galeria são apresentados no Quadro 1 para o Túnel do Marão e no Quadro 2 para o Túnel da Gardunha. Os valores negativos da pressão indicam que a pressão é mais baixa na galeria com a ventilação ativa (descendente) do que na galeria com a ventilação inativa (ascendente). As distâncias X indicadas têm como referência o emboquilhamento de entrada da galeria descendente.

Verificou-se que, quer a velocidade média de 6,31 m/s medida no Túnel do Marão quer a velocidade média de 5,65±0,42 m/s medida no Túnel da Gardunha, se enquadravam dentro da incerteza experimental da velocidade média que resultou de medições detalhadas precedentes realizadas em ambos os túneis (sendo as velocidades de 6,87±0,54 m/s no caso do Túnel do Marão e de 5,81 m/s no caso do Túnel da Gardunha). Dado que as medições precedentes foram realizadas no Túnel do Marão de forma mais detalhada e com maior controlo sobre os diversos eventos no momento da medição e que todas as medições foram realizadas sem tráfego automóvel, que poderia alterar as condições de medição, foi considerada para efeitos deste cálculo a velocidade de 6,87±0,54 m/s. No caso do Túnel da Gardunha, as medições das diferenças de pressão foram realizadas com o túnel em uso; por isso considerou-se sob o ponto de vista teórico mais ajustado considerar a velocidade média de 5,65±0,42 m/s medida aquando da medição das diferenças de pressão.

Quadro 1: Diferença de pressão entre galerias rodoviárias do Túnel do Marão

Número	X [m]	$\Delta P_{\text{túnel}}$ [Pa]
1	5217	-42
2	4817	-20
3	4416	-11
4	4017	0
5	3616	18
6	3216	29
7	2816	-3
8	2416	-50

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

9	2016	-45
10	1616	-30
11	1216	-17
12	816	1.5
13	416	-4.2

Os valores experimentais da velocidade média estabelecida por ação do sistema de ventilação e de controlo de fumo da galeria descendente (sentido do tráfego Este-Oeste) do Túnel do Marão (deduzida das ações naturais) para a secção X = 2000 m estão coligidos no Quadro 4. Indica-se também o valor experimental da velocidade média estabelecida por ação do sistema de ventilação e de controlo de fumo da galeria ascendente (sentido do tráfego Oeste-Este) para a mesma secção. Nesse quadro indicam-se ainda as respetivas estimativas da incerteza padrão. A incerteza expandida pode ser obtida multiplicando estes resultados pelo fator 2. No caso do Túnel da Gardunha não foram realizadas medições com outros regimes de ventilação.

Quadro 2: Diferença de pressão entre galerias rodoviárias do Túnel da Gardunha

Número	X [m]	$\Delta P_{\text{túnel}}$ [Pa]
1	350	-35.8
2	575	-32.7
3	800	-33.1
4	1025	-34.8
5	1275	-13.2

5. ESTIMATIVA DAS CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DO TÚNEL E DISCUSSÃO

Na estimativa das características aerodinâmicas do Túnel do Marão assumiu-se que a temperatura no instante da medição era de 12°C, tomou-se como referência a altitude de 708 m (valor médio entre os emboquilhamento de Este e Oeste) e assumiu-se que o impulso não confinado desenvolvido por cada ventilador é de 776 N (valor médio correspondente a 6 ventiladores bidirecionais com o impulso unitário de 808 N, e a 26 ventiladores unidirecionais com o impulso unitário de 769 N). Considerou-se a velocidade média do escoamento medida na secção X = 2000 m, de $\bar{V} = 6,87 \pm 0,54 \text{ m/s}$. O melhor ajustamento entre os resultados experimentais e a curva estimada da variação de pressão é obtido para os valores das variáveis apresentados no Quadro 3. A Figura 1 representa a variação da diferença de pressão estimada e compara com os valores medidos experimentalmente ($\bar{V} = 6,87 \text{ m/s}$). A origem do referencial encontra-se no emboquilhamento Este (lado de Vila Real). Nesta figura, o crescimento da pressão é devida à presença dos grupos de ventiladores de impulso ativos dispostos ao longo da galeria (quarto termo do primeiro membro da equação 1) e o decréscimo de pressão ao longo do túnel é devido à perda de carga ao longo da galeria do túnel (primeiro termo do segundo membro da equação 1).

Quadro 3: Estimativa das características aerodinâmicas do Túnel do Marão

	\bar{V}		
	$6,87 - 0,54 \text{ m/s}$	$6,87 \text{ m/s}$	$6,87 + 0,54 \text{ m/s}$
Coefficiente de instalação k	0,85	0,92	0,94
Fator de atrito f	0,013	0,011	0,010
Coefficiente de perda de carga no emboquilhamento de entrada ξ_e	0,2	0,0	0,0
Coefficiente de perda de carga no emboquilhamento de saída ξ_s	1,0	1,0	1,0

Salienta-se que o coeficiente de perda de carga para o emboquilhamento de entrada é muito baixo, não sendo possível estimar um valor diferente de zero (para a velocidade $\bar{V} = 6,87 \text{ m/s}$). A conversão de pressão em energia cinética ocorre logo à entrada do túnel, pelo que ocorre nesse local a redução da pressão estática e não

à saída do túnel, na qual o coeficiente de perda de carga é muito próximo de 0; apesar disso, nos quadros a perda irreversível da energia cinética foi incluída no coeficiente de perda de carga do emboquilhamento de saída.

Tendo em conta a incerteza que envolve os valores de velocidade, utilizou-se o modelo de cálculo das perdas de carga no túnel para estimar as velocidades médias do escoamento com 12, 14 e 24 ventiladores ativos e compararam-se esses resultados com as velocidades medidas (ver Quadro 4). No modelo consideram-se as características aerodinâmicas do túnel seguintes: coeficiente de instalação $k = 0,92$, fator de atrito $f = 0,011$, coeficiente de perda de carga no emboquilhamento de entrada $\xi_e \approx 0,0$ e coeficiente de perda de carga no emboquilhamento de saída $\xi_s = 1$. Verifica-se que estes valores satisfazem as medições de pressão e são coerentes com as medições de velocidade realizadas no túnel com 24, 14 (medição efetuada na galeria ascendente) e 12 ventiladores ativos (Quadro 4), pelo que serão adotadas nas verificações subsequentes. No Quadro 4 apresentam-se também os limites de incerteza da estimativa da velocidade média. Esses limites foram calculados adotando os valores das características aerodinâmicas do túnel estimadas a partir das velocidades $\bar{V} = 6,87 \pm 0,54 \text{ m/s}$, apresentadas no Quadro 3; por essa razão a velocidade estimada é idêntica à velocidade medida no caso de 32 ventiladores ativos. Os valores de velocidade obtidos com 12 ventiladores ativos são mais sensíveis a efeitos espúrios que não tenham sido considerados no cálculo das incertezas, pelo se encontram no limite dos intervalos combinados de incerteza. Note-se que a existência de uma boa aproximação ao valor medido na galeria ascendente, com 14 ventiladores de impulso, permite confirmar a hipótese de que ambas as galerias são aerodinamicamente iguais.

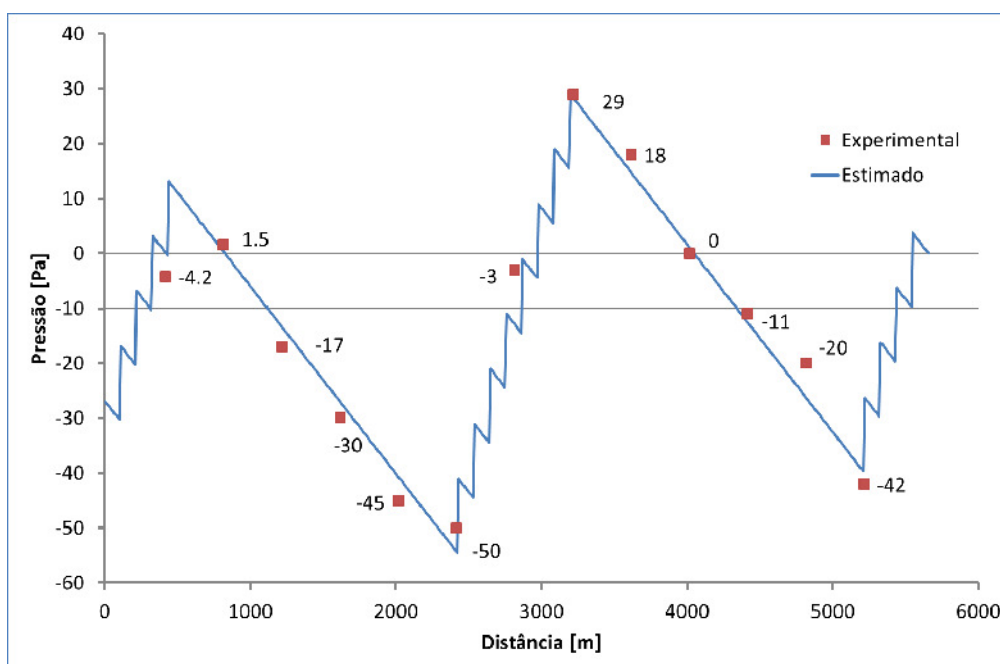


Figura 1: Comparação da diferença de pressão estimada entre galerias rodoviárias e respetiva medição no Túnel do Marão

Quadro 4: Comparação entre velocidade média medida e estimada no Túnel do Marão

Número de ventiladores ativos	Velocidade média medida [m/s]	Velocidade média estimada [m/s]
12 (galeria descendente)	3,73±0,30	4,43 ^{+0,28} _{-0,42}
14 (galeria ascendente)	4,53±0,32	4,75 ^{+0,40} _{-0,39}
24 (galeria descendente)	5,91±0,47	6,07 ^{+0,38} _{-0,57}
32 (galeria descendente)	6,87±0,54	6,87±0,54 [‡]

Na estimativa das características aerodinâmicas do Túnel da Gardunha assumiu-se que a temperatura no instante da medição era de 10°C, tomou-se como referência a altitude de 627 m (valor médio entre os

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
Las Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

emboquilhamento de Norte e Sul) e assumiu-se que o impulso não confinado desenvolvido por cada ventilador é de 900 N (6 ventiladores) ou de 1058 N (7 ventiladores), consoante o seu tipo. Considerou-se a velocidade média do escoamento medida na secção X = 905 m, de $\bar{V} = 5,65 \pm 0,42 \text{ m/s}$. O melhor ajustamento entre os resultados experimentais e a curva estimada da variação de pressão é obtido para os valores das variáveis apresentadas no Quadro 5. A Figura 2 representa a variação da diferença de pressão estimada e compara com os valores medidos experimentalmente no Túnel da Gardunha ($\bar{V} = 5,65 \text{ m/s}$). A origem do referencial encontra-se no emboquilhamento Sul (lado de Alpedrinha). Neste modelo de cálculo foi incluída a existência de perdas de carga correspondentes a uma zona de alargamento da secção existente sensivelmente a meio do túnel. Foram considerados os coeficientes de perda de carga $\xi_{\text{expansão}} = 0,0625$ e de $\xi_{\text{contração}} = 0,0625$, respetivamente para a expansão e para a contração; para a sua estimativa seguiu-se a informação de [13]. Existem ainda diversas obstruções ao escoamento, constituídas nomeadamente pelo painel de mensagens variáveis, por painéis cruz-seta e por painéis de limitação de velocidade, cujo coeficiente de perda de carga global foi estimado em $\xi_{\text{obstruções}} = 1,44$ [13]. Verifica-se que, para a velocidade do escoamento de 5,65 m/s e à temperatura de 10°C, a perda de carga é de 26,58 Pa. Se este valor for relacionado com o fator de atrito, verifica-se que esta pressão corresponde, nas mesmas condições de velocidade e de temperatura, a um valor de 0,00685 do fator de atrito. Se o fator de atrito for deduzido deste valor passa a ter o valor de $f \approx 0,019$, que está muito próximo do valor recomendado por [2] para paredes em betão ($f = 0,020$). Essa publicação indica também que o coeficiente de perda de carga de entrada se situa normalmente entre 0,4 e 0,6. O Túnel da Gardunha apresenta um valor um pouco superior, de 0,84, que pode ser devido à existência de uma curva na proximidade do emboquilhamento sul (de entrada).

Quadro 5: Estimativa das características aerodinâmicas do Túnel da Gardunha

	\bar{V}		
	$5,65 - 0,42 \text{ m/s}$	$5,65 \text{ m/s}$	$5,65 + 0,42 \text{ m/s}$
Coefficiente de instalação k	0,84	0,84	0,85
Fator de atrito f	0,031	0,026	0,022
Coefficiente de perda de carga no emboquilhamento de entrada ξ_e	1,12	0,84	0,61
Coefficiente de perda de carga no emboquilhamento de saída ξ_s	1,0	1,0	1,0

No caso do Túnel do Marão é de assinalar que o fator de atrito é de cerca de metade do reportado por [2] e que o coeficiente de perda de carga de entrada é praticamente nulo. Embora estes valores pareçam estranhos assinala-se que o processo de medição da diferença de pressão incluiu 13 pontos de medição com valores elevados, o que incrementa substancialmente o rigor do cálculo. Para além disso, o modelo de cálculo prevê razoavelmente os valores de velocidade medidos, como se constata no Quadro 4. Sabendo-se que, nas condições de ensaio, o número de Reynolds $Re = 3,95 \times 10^6$, verifica-se (consultando o Diagrama de Moody) que corresponde a uma rugosidade absoluta de $\epsilon = 4,4 \times 10^{-4} \text{ m}$; embora este valor pareça ser baixo, salienta-se que o Túnel do Marão tem muito poucas singularidades na sua secção e que os equipamentos (luminárias, cablagens, etc.) estão dispostos essencialmente no sentido do escoamento, sendo por isso pouco relevantes enquanto obstáculos.

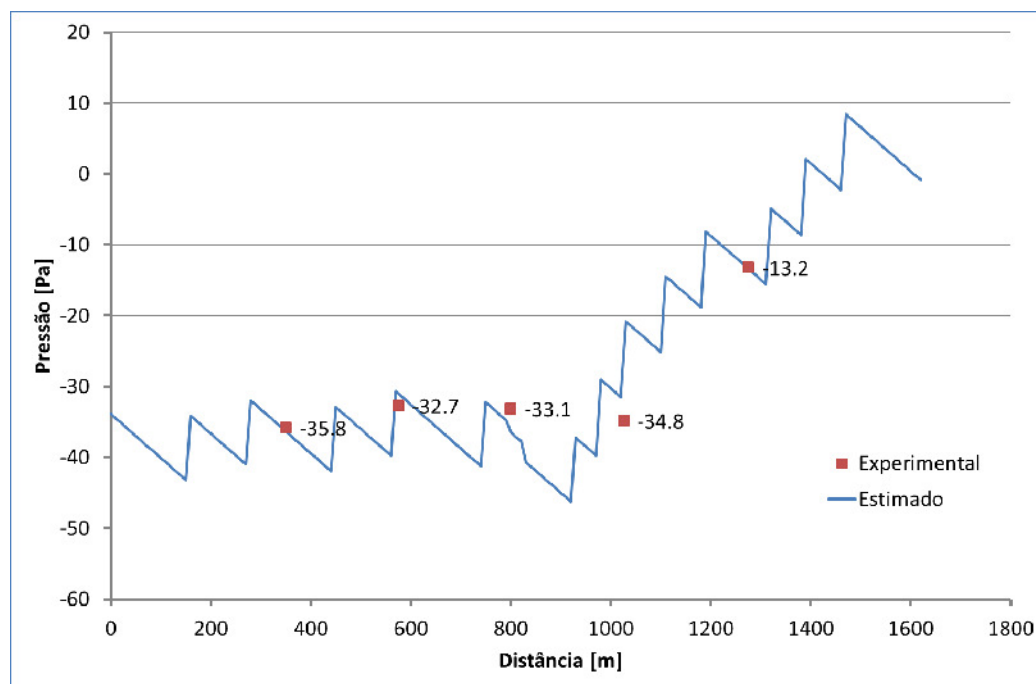


Figura 2: Comparação da diferença de pressão estimada entre galerias rodoviárias e respetiva medição no Túnel da Gardunha

6. IMPACTE DO INCÊNDIO NA DIFERENÇA DE PRESSÃO ENTRE GALERIAS RODOVIÁRIAS E DISCUSSÃO

Os modelos desenvolvidos foram utilizados para prever a variação da diferença de pressão entre galerias rodoviárias em situação de incêndio. Para cada túnel foi utilizado o seu cenário de incêndio de referência, que é de 30 MW de potência calorífica libertada para o Túnel da Gardunha e de 70 MW para o do Marão. Foram analisadas as situações de incêndio (na galeria descendente) a 10 m do emboquilhamento de entrada, após a primeira galeria transversal (a 400 m no Túnel da Gardunha e a 1000 m no do Marão, para ser localizado após a primeira galeria transversal para viaturas) e na segunda metade da galeria rodoviária (a 1100 m no Túnel da Gardunha e a 3300 m e a 5300 m no do Marão). Os perfis de pressão estão representados nas Figuras 3 e 4. Nessas figuras encontra-se bem marcado o local do incêndio devido à perda de carga que ocorre nesse local. Note-se que quando ocorre o incêndio, devido ao incremento das restrições ao escoamento, a velocidade média na entrada do túnel é mais baixa, quando comparada com a situação sem incêndio. Nestes cenários de incêndio consideram-se os veículos, quando se encontram dentro do túnel, parados.

No modelo do Túnel do Marão, devido à sua extensão, são mais notórios os efeitos do incêndio. Verifica-se que os efeitos de restrição ao escoamento e de chaminé (que se opõe ao escoamento descendente) são determinantes para a evolução das pressões. Assim, quando ocorre antes dos grupos de ventiladores de impulso ($X = 10$ m) ou a montante da maioria dos grupos de ventiladores de impulso ($X = 1000$ m), verifica-se que se geram pressões negativas muito mais importantes quando comparadas com a situação sem incêndio. Por outro lado, quando o incêndio ocorre a jusante da maioria dos grupos de ventiladores de impulso ($X = 3300$ m e $X = 5300$ m) verifica-se que as pressões são superiores às que ocorrem em situação sem incêndio.

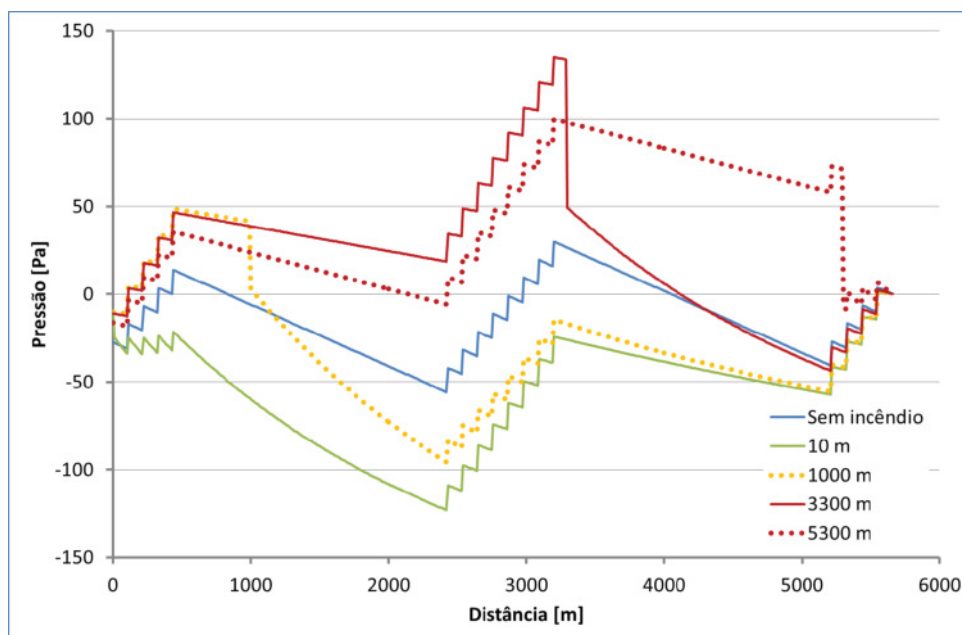


Figura 3: Comparação da diferença de pressão estimada entre galerias rodoviárias no Túnel do Marão com e sem incêndio

No caso do Túnel da Gardunha estas regras estão perturbadas pelo facto dos 7 ventiladores de saída terem impulsos superiores aos dos 6 ventiladores de entrada, pelo facto da análise precedente atribuir um valor elevado à perda de carga no emboquilhamento de entrada e pelo facto do cenário de incêndio de referência ter uma potência inferior ao do Túnel do Marão. Ainda assim, constata-se que o incêndio junto do emboquilhamento de entrada conduz a pressões mais negativas do que a situação de referência sem incêndio e que o incêndio localizado na segunda metade do túnel incrementa significativamente as pressões. As velocidades no emboquilhamento de entrada são progressivamente crescentes com a distância do local do incêndio, devido à redução do efeito de chaminé. No caso do incêndio localizado em $X = 400$ m, embora a diferença de pressão no emboquilhamento de entrada seja mais negativa do que para o caso $X = 10$ m, esta última baixa logo após o local do incêndio, pelo que a primeira constitui a curva com diferenças de pressão mais elevadas até à distância X em que se situa o incêndio, passando então a ser a curva $X = 1100$ m que passa a registar os valores mais elevados.

Estas variações de pressão têm consequências muito significativas na utilização das galerias de interligação em situação de incêndio. Em primeiro lugar deve referir-se que não é suposto existirem ocupantes para serem evacuados a jusante do local do incêndio pois as viaturas que já passaram o incêndio devem prosseguir até ao fim do túnel e sair em segurança e, se o acidente com incêndio ocorrer na cauda de uma fila formada por outro acidente, esses perfis de diferença de pressão só serão atingidos vários minutos após o início do incêndio, dando tempo para uma evacuação que deve ser rápida. Os ocupantes que estiverem a montante do acidente também devem proceder a uma evacuação rápida, que também deve ocorrer antes de serem atingidos estes perfis de diferença de pressão, não sendo, portanto, problemático. No caso das equipas de emergência, que poderão ser tentadas a utilizar as galerias de interligação para acederem da galeria não sinistrada à galeria sinistrada a montante do incêndio, poderão confrontar-se com diferenças de pressão da ordem de 50 Pa, se o incêndio for a jusante do primeiro conjunto de ventiladores de impulso, ou de mais de 100 Pa se o incêndio for a jusante do segundo conjunto de ventiladores de impulso. Tais pressões requerem uma prática específica na abertura e fecho de portas que, se não for seguida poderá impedir o fecho dos portões para veículos. Se houver galerias veiculares abertas a montante do incêndio, estas diferenças de pressão promoverão o escoamento de uma parte do ar novo da galeria sinistrada para a não sinistrada, reduzindo a eficácia do sistema de controlo de fumo.

Note-se que estas diferenças de pressão poderão ser ligeiramente alteradas (incrementadas ou decrementadas) dependendo da posição dos ventiladores ativos na galeria não sinistrada (este aspeto não é objeto de análise no modelo que aqui se apresenta, que não considera ventilação na galeria não-sinistrada). Para além disso, o controlo de velocidade do escoamento no túnel, no qual se impede que a velocidade atinja valores significativamente superiores ao da velocidade crítica, vai limitar muito as diferenças de pressão para cenários de incêndio inferiores aos de referência. Também a adoção de controlo de fumo por pressurização nas galerias de interligação contribui para limitar os efeitos destas diferenças de pressão. Todavia, no caso das situações dos cenários de incêndio de referência, constata-se que as diferenças de pressão que podem ocorrer aconselham a que não sejam abertas galerias transversais ou que estas sejam abertas apenas o mais próximo possível do emboquilhamento de entrada e apenas quando a localização do incêndio for longe. Ainda assim, considera-se que esta última situação pode ser arriscada se não for feito um estudo que englobe também o funcionamento, em simultâneo, dos ventiladores da galeria não-sinistrada.

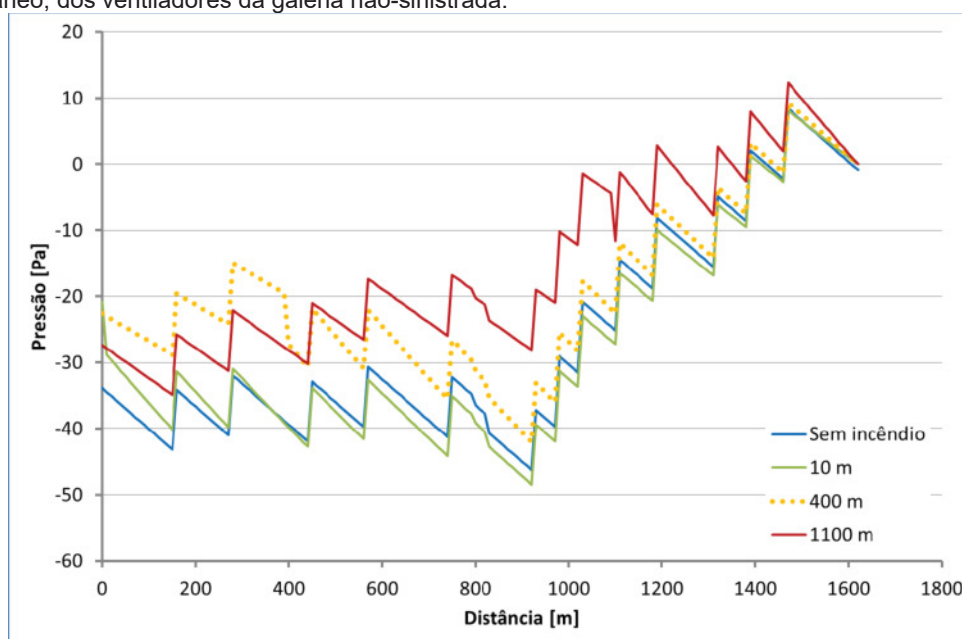


Figura 4: Comparação da diferença de pressão estimada entre galerias rodoviárias no Túnel da Gardunha com e sem incêndio

7. CONCLUSÕES

Neste estudo foram realizadas medições de velocidade do escoamento na galeria rodoviária de declive descendente e de diferença de pressão entre as galerias rodoviárias nos túneis do Marão e da Gardunha. Essas medições permitiram o ajustamento, pelo método dos mínimos quadrados, de um modelo unidimensional do escoamento, baseado na Equação de Bernoulli. Desta forma foi possível estimar os coeficientes de perda de carga nos portais, o fator de atrito de cada túnel e os coeficientes de instalação dos ventiladores de impulso. Foi realizada uma análise de sensibilidade dos modelos desenvolvidos para cada túnel à localização (distância ao portal de entrada) do incêndio de referência.

Os resultados evidenciam que a pressão na galeria rodoviária sinistrada aumenta a montante da localização do incêndio e é decrementada a jusante desta, quando se toma como referência o perfil de pressão do escoamento sem incêndio. Os modelos evidenciam que podem ser atingidas diferenças de pressão entre as duas galerias rodoviárias na gama de [135 Pa; -120 Pa] no túnel do Marão e de [12 Pa; -48 Pa] no Túnel da Gardunha. A existência de diferenças de pressão fortemente positivas a montante do incêndio torna particularmente sensível a abertura de portões veiculares nas galerias transversais para veículos, pois o caudal de ar aí escoado a partir da galeria sinistrada pode ter impacte negativo no desempenho do sistema de controlo de fumo.

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

AGRADECIMENTOS

Os resultados experimentais relativos à medição da velocidade na secção X = 2000 m, cuja metodologia foi expressa em [10], foram obtidos com a colaboração do consórcio construtor da fase de Conclusão do Empreendimento do Túnel do Marão (Consórcio Teixeira Duarte, Engenharia e Construções, S.A. – EPOS, Empresa Portuguesa de Obras Subterrâneas, S.A.).

REFERÊNCIAS

- [1] NFPA 502 – *Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*. National Fire Protection Association, 2017.
- [2] Centre D'Études des Tunnels – *Dossier Pilote des Tunnels. Equipements. Ventilation*. 2003. ISBN 2-11-084740-9
- [3] Technical Committee 3.3 Road Tunnels Operatios – *Design Fire Characteristics for Road Tunnels*. World Road Association, 2017. ISBN 978-2-84060-471-6
- [4] Bring, A., Malmström, T., Boman, C. A. - *Simulation and measurement of road tunnel ventilation*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12 (3), 1997, 417-424.
- [5] Janga, H.-M., Chen, F. - *On the determination of the aerodynamic coefficients of highway tunnels*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 869–896.
- [6] Steinemann, U., Zumsteg, F. - *Measurements of air flow, temperature differences and pressure differences in road tunnels*. In: *International Conference Tunnel Safety and Ventilation*, Graz, Austria, 2004, pp. 220–226.
- [7] Collela, F., Rein, G., Borchiellini, R., Carvel, R., Torero, J.L., Verda, V. - *Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modelling approach*. *Build. Environ.* 44, 2009, 2357–2367.
- [8] Tong, Y., Wang, X., Zhai, J., Niu, X., Liu, L. - *Theoretical predictions and field measurements for potential natural ventilation in urban vehicular tunnels with roof openings*. *Building and Environment* 82 (2014) 450-458.
- [9] Levoni, P., Angeli, D., Stalio, E., Agnani, E., Barozzi, G. S., Cipollone, M. - *Fluid-dynamic characterisation of the Mont Blanc tunnel by multi-point airflow measurements* *Tunnelling and Underground Space Technology* (48) 2015, 110–122.
- [10] Santos, D.; Saraiva, J.; Rodrigues, J. P. – *Escoamento Longitudinal em Túneis Longos*. 5.^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos. Lisboa, 2016.
- [11] Viegas, João Carlos – *Avaliação do desempenho de sistemas de ventilação e de controlo de fumo em túneis*. CMNE 2016 – 10.º Congresso Nacional de Mecânica Experimental. Lisboa, LNEC, 2016.
- [12] ISO 13350 - Fans -- *Performance testing of jet fans*. International Organization for Standardization, 2015.
- [13] Blevins, R. D. - *Applied Fluid Dynamics Handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold : 1984.