

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E DE CONTROLO DE FUMO EM TÚNEIS

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF TUNNEL VENTILATION AND SMOKE CONTROL SYSTEMS

João Carlos Viegas
Departamento de Edifícios, LNEC



RESUMO

O Decreto-Lei 75/2014, que atualiza a transposição para a ordem jurídica nacional da Diretiva n.º 2004/54/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de abril de 2004, relativa aos requisitos mínimos de segurança para túneis da Rede Rodoviária Transeuropeia (RTE), designa o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) como entidade fiscalizadora no âmbito desse diploma legal. No âmbito das inspeções de segurança que o LNEC desenvolve, é avaliado experimentalmente o desempenho dos sistemas de ventilação e de controlo de fumo. Nesta comunicação descreve-se a metodologia adotada.

ABSTRACT

Decree-Law 75/2014, which updates the transposition into national law of Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels of the Trans-European Road Network, designates the National Civil Engineering Laboratory (LNEC) as supervisory authority. While conducting safety inspections, LNEC evaluate experimentally the performance of ventilation and smoke control systems. In this paper we describe the methodology adopted.

Palavras-chave: Túneis / Ventilação / Controlo de fumo

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal a grande maioria dos túneis de comprimento superior a 500 m está dotado de sistemas de ventilação e de controlo de fumo longitudinais, baseados na utilização de ventiladores axiais suspensos no teto que aplicam ao fluido o impulso necessário para promover o escoamento. A avaliação do desempenho dos sistemas de ventilação e de controlo de fumo dos túneis passa necessariamente pela medição do campo de velocidade no interior do túnel. Em túneis em uso normalmente não é possível fechar qualquer galeria rodoviária ao tráfego, pelo que o tráfego rodoviário aplica impulso ao escoamento, por efeito de pistão, que pode falsear a avaliação do desempenho do sistema de ventilação e de controlo de fumo. Para além disso, as diferenças de temperatura que ocorrem entre o interior do túnel e o exterior, promovem o escoamento, por efeito de chaminé. O vento pode também ter um efeito perturbador muito significativo. Quando é possível o encerramento da galeria rodoviária para a realização de medições é possível remover o efeito perturbador do tráfego, mas ainda assim é necessário serem tidas em conta as ações do vento e das diferenças de temperatura. As rotinas de medição devem permitir limitar a influência destas outras ações sobre o escoamento, para além da ação dos ventiladores de impulso.

Para se proceder à avaliação do desempenho dos sistemas de ventilação e de controlo de fumo de túneis é necessário realizar medições de grandezas características a partir das quais seja possível deduzir o desempenho em regime quase isotérmico, como é o caso da ventilação, ou o desempenho em situação de incêndio.

É ainda limitada a publicação de resultados de medição de velocidades do escoamento e do impulso em túneis. Embora estejam reportadas medições em diversos túneis (por exemplo Bring, Malmström e Boman 1997; Levoni et al. 2015; Steinemann e Zumsteg 2004) ou propostas de metodologia (Santos, D., Saraiva, J. e Rodrigues 2016) não são conhecidas análises de incerteza para este ambiente de medição, embora tenham sido desenvolvidos trabalhos para a avaliação de erros na medição de caudais em condutas tendo em conta a existência de singularidades (Caré, I., Bonthoux, F. e Fontaine, J.-R. 2014). Assim, é relevante e inovador proceder-se à avaliação da incerteza inerente à realização de medições de campos de velocidade em túneis quer com métodos expeditos, quer com métodos mais rigorosos.

No caso dos túneis nacionais das redes rodoviárias transeuropeia e nacional, é sempre utilizado um esquema de ventilação longitudinal, que obriga à medição das velocidades impostas pelos ventiladores de impulso na própria galeria rodoviária. Uma vez que, salvo

raras exceções, de uma forma geral não é possível encerrar a galeria ao tráfego, foi necessário desenvolver uma metodologia que, embora com uma maior incerteza, permita, ainda assim, avaliar esse desempenho. Nesta comunicação analisa-se o incremento de incerteza que ocorre com a utilização de um método de medição mais expedito, sem o encerramento do túnel ao tráfego, com o método mais corrente, no qual as medições não são perturbadas pelo tráfego, e apontam-se vias para a sua redução.

2. METODOLOGIA E RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Num túnel com a secção indicada na figura 1 foi realizada a medição pontual da velocidade numa malha de pontos distribuída de acordo com a figura 2 em três secções diferentes e com diferentes ações. A medição foi realizada com um anemómetro de turbina da marca Airflow e modelo AV6 com uma turbina de 100 mm de diâmetro. O instrumento foi previamente calibrado. Da análise da calibração verifica-se que a incerteza expandida, para a gama de valores compreendida entre 0,80 m/s e 9,00 m/s, se enquadra entre 0,10 m/s e 0,17 m/s. A medição em cada ponto corresponde à média de 10 medições instantâneas.

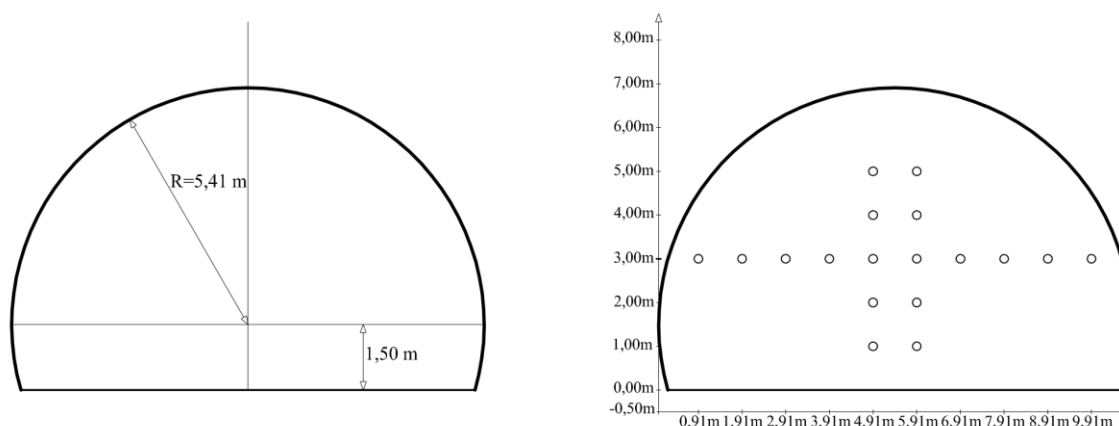


Fig. 1 – Secção transversal do túnel e malha de medição da velocidade

Neste túnel os ventiladores de impulso estão afastados longitudinalmente cerca de 150 m entre si. Para minimizar a influência do ventilador de jusante, as secções de trabalho foram estabelecidas a cerca de 3 diâmetros deste (o diâmetro hidráulico é de 7,9 m), encontrando-se assim a cerca de 15 diâmetros do ventilador a montante, distância para a qual a influência dos ventiladores de impulso no perfil de velocidade é reduzida. Um túnel, a menos de singularidades de efeito local, pode ser assimilado a um tubo no qual existe um escoamento completamente desenvolvido, se este for suficientemente longo. Para o caso de escoamento completamente turbulento, o comprimento de entrada necessário para se obter

um escoamento completamente desenvolvido é da ordem de 40 diâmetros, condição que é satisfeita para as secções de medição.

Para números de Reynolds superiores a 10^6 (como é o caso desta medição em que $Re \approx 1,8 \times 10^6$) o perfil de velocidade v é adequadamente aproximado pela lei de potência, dada pela seguinte expressão, com o parâmetro $n = 10$, sendo v_{max} a velocidade máxima do perfil, R o raio e r a coordenada radial.

$$\frac{v}{v_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (1)$$

As velocidades medidas V foram adimensionalizadas em termos da sua amplitude (V/V_{max}), tomando como referência a velocidade máxima medida no perfil teórico (V_{max}), e a sua posição na secção (d/D), tomando como referência a distância entre paredes na linha da medição (D). Finalmente as velocidades adimensionais medidas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados ao perfil de velocidade dado pela expressão (1). Os perfis resultantes para uma das secções estão representados na figura 2. Foi ainda estimada a velocidade máxima a que corresponde o ajustamento direto de cada ponto à curva teórica e determinada a variância dessas estimativas da velocidade máxima. Os valores resultantes para cada secção estão apresentados no quadro 1.

Tendo em conta que quando a galeria não é encerrada ao tráfego correntemente só é possível medir um perfil horizontal sensivelmente a 3,0 m de altura, no quadro 1 apresentam-se também os valores da média experimental, da média estimada por ajustamento ao perfil da equação (1) e da variância do valor estimado da média.

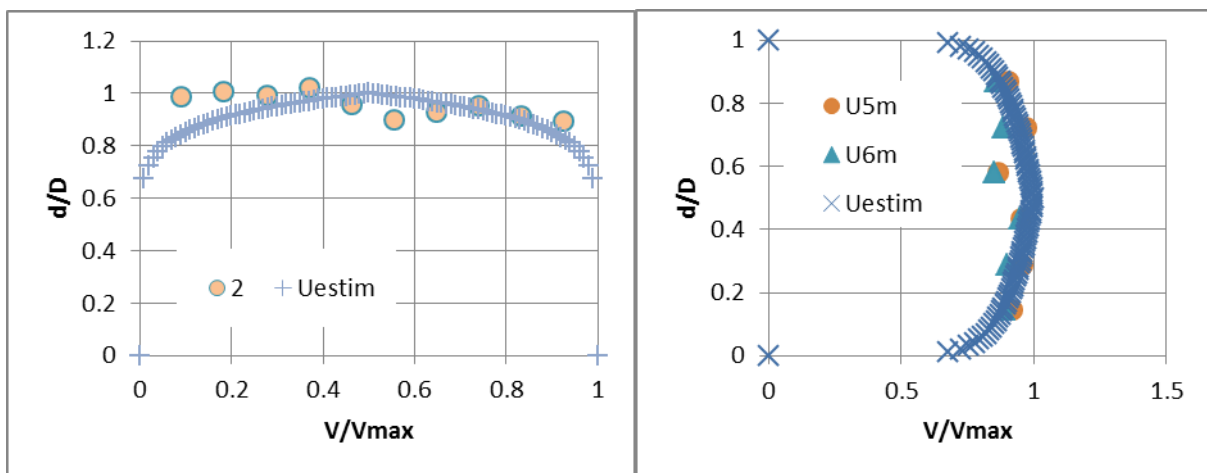


Fig. 2 – Perfis horizontal e vertical de velocidade na secção 1

Todos os valores correspondentes à medição pontual da velocidade resultam de médias temporais de 10 medições instantâneas. Noutro túnel foi possível proceder durante a noite à aquisição dos dados relativos à medição de velocidade com a frequência de 1 Hz, com dois anemómetros (ver figura 3). A galeria estava aberta ao tráfego, embora reduzida a uma via. Verificou-se que, na situação de ventilação ativa em regime estacionário, a incerteza da medição foi de 11% da mensuranda.

Quadro 1 – Valores relevantes dos perfis de velocidade

Posição	Medições	Média das medições [m/s]	Variância da média da medição [m ² /s ²]	Média estimada [m/s]	Variância de estimativa da média [m ² /s ²]
Secção 1	Perfis verticais e horizontal	3.58	0.042	3.56	0.12
	Perfil horizontal	3.73	0.028	3.39	0.29
Secção 2	Perfis verticais e horizontal	5.48	0.190	5.28	0.18
	Perfil horizontal	5.57	0.119	5.18	0.56
Secção 3	Perfis verticais e horizontal	5.48	0.118	5.11	0.18
	Perfil horizontal	5.42	0.037	4.67	1.49

Ainda num outro túnel foi possível medir também velocidades instantâneas em diferentes secções, para diferentes velocidades médias e em diferentes instantes do tempo, estando o túnel encerrado ao tráfego. Verificou-se, nesse caso, que a incerteza estava compreendida entre 1,2% e 3,1% da mensuranda, pelo que se adota o valor mais elevado do intervalo.

Dado que as velocidades do escoamento impostas pelos ventiladores de impulso são afetadas pelas ações naturais (vento e efeito de chaminé devido à diferença de temperatura do ar entre o interior e o exterior do túnel) é necessário proceder-se à correção das velocidades de forma a isolar a contribuição para a velocidade do escoamento correspondente à ação dos ventiladores de impulso. Verifica-se que, em situação de ensaio, antes de se proceder à ativação dos ventiladores, o escoamento no interior do túnel é promovido por ação natural do vento e do efeito de chaminé ou por ação forçada do efeito de pistão dos veículos em movimento no interior do túnel. Estas ações, bem como a ação da ventilação de impulso quando esta está ativa, são equilibradas pelas forças opostas pelo atrito nas paredes, pela perda de carga no portal de entrada, pela perda de energia cinética no portal de saída e pelas forças aerodinâmicas opostas pelas singularidades existentes no interior do túnel (painéis de sinalização, alargamentos e contrações, etc.) ao escoamento. Desde que não seja numa situação de incêndio, todas as forças aerodinâmicas resistentes, no caso de escoamentos turbulentos, são diretamente proporcionais à pressão dinâmica do

escoamento. A expressão (2) 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 é a diferença de pressão gerada pelos ventiladores de impulso no interior do túnel. O termo do segundo membro representa a perda de carga total da galeria do túnel, sendo ξ o coeficiente global de perda de carga, \bar{V}_{va} a velocidade média do escoamento no interior da galeria do túnel numa secção de referência com o sistema de ventilação ativo e ρ a massa volúmica do ar à temperatura interior do túnel. 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 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, k é um 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}_{imp} é a velocidade média do ar à saída dos ventiladores de impulso.

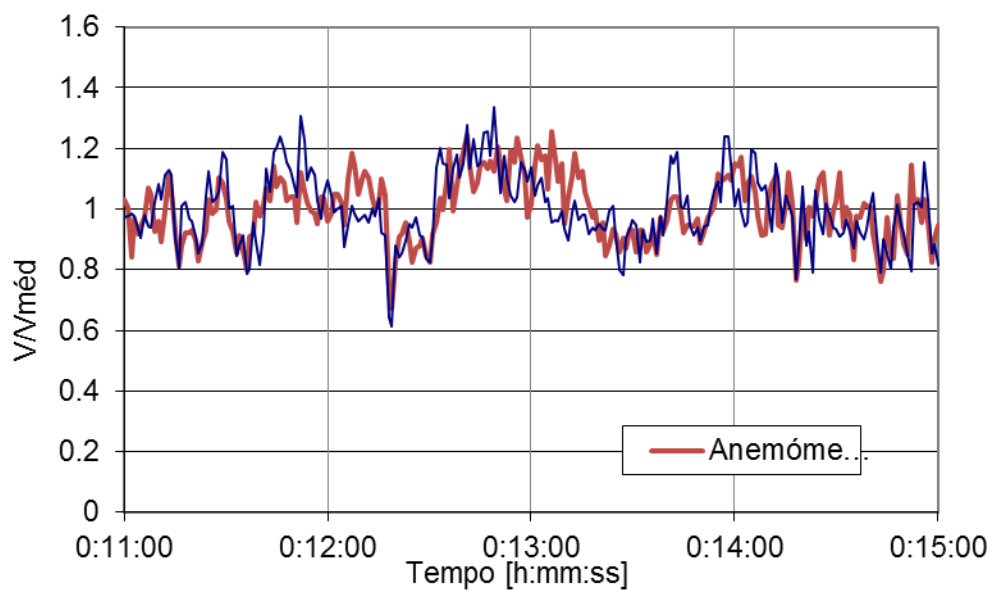


Fig. 3 – Medição instantânea de velocidades

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

A medição da velocidade média no túnel com a ventilação inativa permite avaliar a amplitude da diferença de pressão devida às ações naturais e ao efeito de pistão ou o valor do coeficiente de perda de carga do túnel, de acordo com a equação (3). Por outro lado, a equação (4) permite estimar o impulso aplicado pelos ventiladores de impulso, se for conhecida a velocidade \bar{V}_{sv} que impõem no túnel sem ocorrer o efeito de outras ações. A combinação dos resultados da medição de velocidade com os ventiladores inativos e com os ventiladores ativos permite estimar a velocidade \bar{V}_{sv} através da aplicação das equações (5) e (6), em que \bar{V}_{vna} é a velocidade média medida com o sistema de ventilação inativo antes da sua ativação e \bar{V}_{vnd} é a velocidade média medida com o sistema de ventilação inativo depois da sua ativação.

$$\frac{1}{2}(\delta_{p1} - \delta_{p2})\rho_0\bar{V}_v |\bar{V}_v| + \gamma(\rho_0 - \rho)gL + \frac{1}{2}\frac{C_x\Sigma}{S}\rho\left(U - \frac{\bar{V}_{vna} + \bar{V}_{vnd}}{2}\right)\left|U - \frac{\bar{V}_{vna} + \bar{V}_{vnd}}{2}\right| = \frac{1}{2}\xi\rho\left(\frac{\bar{V}_{vna} + \bar{V}_{vnd}}{2}\right)^2 \quad (3)$$

$$k\frac{F_0}{S}\frac{\rho}{\rho_{Lab}}\left(1 - \frac{\bar{V}_{sv}}{\bar{V}_{Imp}}\right) = \frac{1}{2}\xi\rho\bar{V}_{sv}^2 \quad (4)$$

$$\bar{V}_{sv1} = \sqrt{\bar{V}_{va}^2 + \left(\frac{\bar{V}_{vna} + \bar{V}_{vnd}}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$$\bar{V}_{sv2} = \sqrt{\bar{V}_{va}^2 - \left(\frac{\bar{V}_{vna} + \bar{V}_{vnd}}{2}\right)^2} \quad (6)$$

A equação 5 aplica-se quando as velocidades medidas com o sistema de ventilação ativo e inativo têm sentidos contrários e a equação 6 aplica-se quando estas têm o mesmo sentido.

Note-se que o primeiro e o segundo termos do primeiro membro da equação (2), que representam a ação do vento e o efeito de chaminé não dependem diretamente da velocidade do escoamento no interior do túnel, pelo que é razoável admitir-se que variam pouco ao longo dos ensaios e que o seu efeito poderá ser representado pelo seu valor médio nesse intervalo de tempo. Todavia, os terceiro e quarto termos da equação (2),

representando o efeito de pistão devido aos veículos automóveis e o impulso transmitido ao escoamento pelos ventiladores de impulso, têm uma dependência explícita da velocidade do escoamento, não podendo ser considerado “à priori” que o seu efeito no contexto das equações (2) e (3), para o efeito de pistão, e das equações (2) e (4), para a ação dos ventiladores de impulso, se mantém inalterado.

Tem sido possível reduzir a importância do erro introduzido pelo efeito de pistão. Para isso procura-se realizar as medições em período noturno (após as 00:00 horas), em que praticamente não existe tráfego pesado e em que ocorrem mesmo períodos durante os quais não existe qualquer veículo na galeria (note-se que este cuidado é também necessário para segurança do operador, que tem de fazer medições da velocidade do escoamento também nas vias abertas ao tráfego), e limitar a velocidade de circulação. Com frequência são obtidos valores de $\frac{\bar{v}_{vna} + \bar{v}_{vnd}}{2} \approx 1,5 \text{ m/s}$ e valores de $\bar{v}_{va} \approx 5,5 \text{ m/s}$, enquanto a velocidade de circulação é limitada a 22,2 m/s. Assim o erro introduzido é de 18% do valor do efeito de pistão. Embora possa parecer muito relevante, note-se que é normal conseguir-se fazer medições sem se encontrarem veículos no interior do túnel. Assim, considerar-se o impulso de um veículo ligeiro constitui já uma majoração, estimando-se assim que o erro é inferior a 42 N.

No caso do termo relativo ao impulso aplicado pelos ventiladores de impulso, verifica-se que a velocidade média de saída do escoamento dos ventiladores de impulso está compreendida para vários modelos entre 26 m/s e 30 m/s. Tomando como referência o valor intermédio de 28 m/s, verifica-se que o erro introduzido na avaliação é de 0,7%, de acordo com a expressão (7).

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\bar{v}_{sv}}{\bar{v}_{Imp}}\right) - \left(1 - \frac{\bar{v}_{va}}{\bar{v}_{Imp}}\right) \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{\bar{v}_{va} - \sqrt{\bar{v}_{va}^2 - \left(\frac{\bar{v}_{vna} + \bar{v}_{vnd}}{2}\right)^2}}{\bar{v}_{Imp}} \quad (7)$$

Note-se que por este método (ver equação 4) o produto kF_0 é determinado em função de ξ , mas esta indeterminação não prejudica a determinação da velocidade imposta pelo sistema de ventilação no túnel nos cenários de projeto. Efetivamente são razoavelmente conhecidos, os valores quer dos coeficientes de perda de carga típicos de túneis, quer os valores dos coeficientes de instalação dos ventiladores, pelo que, face aos resultados dos valores de medição das velocidades e tendo em conta os valores de impulso dos ventiladores declarados pelo seu fabricante, é possível avaliar a coerência dos resultados e diagnosticar

eventuais situações de deficiente avaliação dos coeficientes de perda de carga e dos coeficientes de instalação no projeto, podendo conduzir a situações de insuficiência do sistema de ventilação e de controlo de fumo. Para túneis deste tipo, os coeficientes de instalação variam normalmente entre 0,80 e 0,90. Se a distância entre o ventilador e o teto for de 1/3 do diâmetro do ventilador, $k = 0,85$ (CETU, 2003). Assim pode estimar-se o erro relativo na estimativa do impulso de $\varepsilon = 0,05/0,80 = 0,06$. Uma vez estimado o impulso efetivamente aplicado pelos ventiladores na condição de ensaio é possível estimar as perdas de carga do escoamento no túnel e estimar a velocidade imposta pelo sistema de ventilação e de controlo de fumo nos cenários de projeto para ventilação e para controlo de fumo, verificando-se, tendo em conta as incertezas inerentes ao método, se o sistema implementado tem desempenho adequado.

3. ESTIMATIVA DA INCERTEZA E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base nos erros estimados de acordo com a análise precedente são aqui estimadas as incertezas de acordo com a metodologia expressa no documento JCGM 100:2008. Os valores parciais que compõem a estimativa da incerteza estão indicados no quadro 2.

O primeiro componente a considerar na incerteza é o processo de calibração do anemómetro. O segundo componente da medição advém do processo de média temporal das medições de velocidade, onde se verificou por uma avaliação do tipo A que a incerteza varia entre 3,1% e 11% do valor da mensuranda, dependendo do túnel estar fechado ou aberto ao tráfego.

O terceiro componente resulta do processo de estimativa da velocidade média do escoamento no túnel, que constitui uma avaliação de incerteza do tipo A. Considerou-se o valor mais desfavorável que foi estimado para cada secção.

No primeiro caso (do terceiro componente), se for feita o ajustamento por mínimos quadrados ao perfil turbulento e a partir daí se determinar a velocidade média do perfil, a estimativa da variância da média é de $S^2(\bar{V}) = 0,00947\bar{V}^2 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Se não for feito esse ajustamento e for apenas tomada a velocidade média, existe um desvio relativamente ao valor médio estimado da velocidade que tem de ser tido em consideração na incerteza, que resulta da diferença entre a média experimental e o valor médio estimado, que é considerado nos restantes três casos e integrado na incerteza.

Quando é apenas medido o perfil horizontal, se for feito o ajustamento ao perfil turbulento teórico, é considerada a variância da estimativa média realizada através deste ajustamento

e considerado o desvio existente relativamente ao valor médio estimado (com perfis vertical e horizontal) da velocidade. Quando é tomado apenas o valor médio experimental, deve também considerar-se o desvio entre a média experimental (do perfil horizontal) e a estimativa da média (obtida com perfis vertical e horizontal), para além da respetiva variância experimental.

Finalmente, há ainda a considerar o erro associado à aplicação de impulso pelos ventiladores, tal como evidenciado na equação (7).

Os restantes componentes da incerteza estão expressos como erros no impulso, pelo que são considerados diretamente no cálculo desta grandeza, estando expressos no quadro 3. Nestes casos, os valores indicados constituem limites superior e inferior do erro, pelo que se aplica um método de avaliação da incerteza do tipo B.

Quadro 2 – Componentes da estimativa da incerteza da velocidade do escoamento

Descrição	Estimativa do erro	Estimativa da variância [m^2/s^2]	Estimativa da incerteza [m/s]
Calibração do anemómetro	[0,05; 0,085] m/s	$S^2(\bar{V}) = 0,00723$	$u(\bar{V}) = 0,085$
Processo de média temporal na medição pontual da velocidade	Túnel aberto ao tráfego	$S^2(\bar{V}) = 0,0121\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,11\bar{V}$
	Túnel fechado ao tráfego	$S^2(\bar{V}) = 0,00095\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,031\bar{V}$
Estimativa da velocidade média no túnel	Com ajustamento a perfil turbulento	$S^2(\bar{V}) = 0,00947\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,097\bar{V}$
	Sem ajustamento de perfil turbulento	$S^2(\bar{V}) = 0,00850\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,092\bar{V}$
	Com ajustamento a perfil turbulento, só perfil horizontal	$S^2(\bar{V}) = 0,07720\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,278\bar{V}$
	Sem ajustamento de perfil turbulento, só perfil horizontal	$S^2(\bar{V}) = 0,00654\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,081\bar{V}$
Impulso aplicado pelos ventiladores de impulso		$S^2(\bar{V}) = 0,00005\bar{V}^2$	$u(\bar{V}) = 0,007\bar{V}$

Quadro 3 – Componentes da estimativa da incerteza do impulso

Descrição	Estimativa do erro	Estimativa da variância	Estimativa da incerteza
Efeito de pistão dos veículos	42 N	$\frac{1}{3}42^2$	24 N
Estimativa do coeficiente de instalação dos ventiladores	6%	$\frac{1}{3}(0,06 F)^2$	0,035F N

Utiliza-se o critério da raiz da soma de quadrados, para combinação de incertezas.

A estimativa do impulso é feita através da equação (4), assumindo para o coeficiente de perda de carga tipicamente o valor de $\xi = 3,5$, para túneis de comprimento da ordem de 1000 m. A incerteza do impulso $[u(F)]$ pode ser estimada a partir da expressão (8).

$$u(F) = \sqrt{(S\xi\rho\bar{V}_{sv})^2 S^2(\bar{V}_{sv}) + 24^2 + (0,035 F)^2} \quad (8)$$

Sabendo-se que nestas condições o impulso estimado é de cerca de 4750 N, a estimativa da incerteza é a indicada no quadro 4. Para se obter a incerteza expandida os valores devem ser multiplicados pelo valor 2.

Quadro 4 – Estimativa da incerteza do impulso

Estado do túnel	Aberto ao tráfego	Fechado ao tráfego
Com ajustamento a perfil turbulento	30%	21%
Sem ajustamento de perfil turbulento	29%	20%
Com ajustamento a perfil turbulento, só perfil horizontal	60%	56%
Sem ajustamento de perfil turbulento, só perfil horizontal	28%	18%

Verifica-se que a incerteza do impulso assume valores elevados em primeiro lugar porque a velocidade influencia o impulso no quadrado, pelo que pequenas variações de velocidade, sendo as velocidades elevadas, representam variações significativas no impulso. Verifica-se também que os componentes principais da incerteza são o processo de média temporal na medição pontual da velocidade (em especial quando o túnel está aberto ao tráfego) e a dispersão dos valores pontuais relativamente à sua média (em particular quando é estimada através do ajustamento a um perfil turbulento com base nas medições de um único perfil horizontal). Quando estas componentes da incerteza são minimizadas é possível obter uma incerteza na estimativa do impulso inferior a 20% (note-se que a incerteza na medição da velocidade é inferior a 9% neste caso).

Verifica-se, neste estudo, que existem condições para minorar a incerteza e, em especial, para a quantificar face aos resultados das medições. No que respeita ao processo de média temporal na medição pontual da velocidade, a sua contribuição é minimizada se for possível escolher períodos em que a velocidade do escoamento seja particularmente regular e se for evitada a realização de medições enquanto persistem perturbações locais induzidas pela passagem de tráfego (situação que ocorreu nos resultados apresentados no gráfico da figura 3 e que conduziram ao valor de incerteza de 11% da velocidade). Para além disso esta componente pode ser de imediato avaliada após a realização da medição simplesmente através da avaliação da variância experimental.

Verifica-se neste túnel que as diversas obstruções ao escoamento existentes, nomeadamente painéis de sinalização, painéis cruz/seta e painéis de mensagem variável tendem a alterar o perfil de velocidade relativamente ao perfil turbulento teórico. Assim, estes resultados evidenciam que, para este caso, não existe uma vantagem significativa em fazer um ajustamento dos valores medidos ao perfil turbulento completamente desenvolvido em alternativa a, simplesmente, tomar a média das velocidades medidas. Esta situação é agravada quando se usa apenas um perfil horizontal para se fazer o ajustamento ao perfil turbulento completamente desenvolvido. Esta componente pode ser minorada através do aumento do número de pontos da medição, em especial em perfis verticais e horizontais, e futuramente através de um melhor conhecimento das formas características dos campos de velocidade que se desenvolvem em túneis. Também neste caso se verifica que esta componente também pode ser estimada através dos resultados experimentais para assim ser possível ter uma medida da qualidade dos resultados.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que é possível utilizar uma metodologia que permite avaliar o impulso aplicado pela ventilação de impulso num túnel, sendo também possível aplica-la quando as galerias rodoviárias devem permanecer abertas ao tráfego. A rotina de medição adotada incorpora os seguintes aspetos:

- Realização das medições em períodos de menor tráfego (normalmente durante a noite);
- Localização das secções de medição em locais onde se espera que o escoamento esteja completamente desenvolvido e longe das perturbações induzidas pelos ventiladores de impulso;
- Medição das velocidades do escoamento que ocorre antes da ativação dos ventiladores de impulso e depois da sua desativação (depois de cessar o seu efeito).

A incerteza inerente à aplicação dessa metodologia é muito sensível ao sucesso da aplicação destes fatores operativos, sendo possível limitá-la a valores inferiores a 20% do impulso.

5. REFERÊNCIAS

- Centre D'Études des Tunnels 2003. Dossier Pilote des Tunnels. Equipements. Ventilation. IBSN 2-11-084740-9
- JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.

- Bring, A., Malmström, T. e Boman, C. A. 1997. Simulation and measurement of road tunnel ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12 (3), 417-424
- P. Levoni, D. Angeli, E. Stalio, E. Agnani, G.S. Barozzi, M. Cipollone 2015- Fluid-dynamic characterisation of the Mont Blanc tunnel by multi-point airflow measurements *Tunnelling and Underground Space Technology* (48) 110–122.
- Steinemann, U., Zumsteg, F. 2004. Measurements of air flow, temperature differences and pressure differences in road tunnels. In: *International Conference Tunnel Safety and Ventilation*, Graz, Austria, pp. 220–226.
- Santos, D., Saraiva, J. e Rodrigues, J. P. 2016. Escoamento Longitudinal em Túneis Longos. 5as. *Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos*, Lisboa.
- Caré, I., Bonthoux, F. e Fontaine, J.-R. 2014. Measurement of air flow in duct by velocity measurements. *EPJ Web of Conferences*, 77.