

**APLICAÇÃO DE MODELO *CFD* PARA AVALIAÇÃO DA DINÂMICA  
DE INCÊNDIO EM TÚNEIS**  
**APPLICATION OF A *CFD* MODEL FOR THE FIRE DYNAMICS  
EVALUATION IN TUNNELS**

**Julia E. Cheroto<sup>a</sup>, Julio C. G. da Silva<sup>b</sup>, Alexandre Landesmann<sup>c</sup> e Fernando L. B. Ribeiro<sup>d</sup>**

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Estruturas e Materiais  
COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, Brasil*

*E-mails <sup>a,b,c,d</sup>: jcheroto@gmail.com; {jcsilva, alandes, fernando}@coc.ufrj.br*

**Palavras Chave:** Incêndio, Dinâmica dos Fluidos, Túneis, Análise Numérica.

**Resumo.** O presente artigo tem como objetivo principal a simulação numérica-computacional da evolução do campo de temperaturas, via Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), em túneis rodoviários urbanos sob condições de incêndio. Para tanto, será utilizado o programa *FDS (Fire Dynamics Simulation)*. O procedimento de análise proposto permite avaliar o comportamento da temperatura em um ambiente confinado, verificar como esta atua em função do espaço e do tempo, para confrontar esses resultados numéricos com curvas analíticas simplificadas previstas pelos códigos normativos relacionados, permitindo-se concluir sobre a aplicabilidade das mesmas. A metodologia proposta é aplicada para um estudo de caso real de uma galeria de túnel da cidade do Rio de Janeiro (Brasil). Os dados característicos correspondentes à carga térmica são incluídos nas análises. Entende-se que o emprego de modelos avançados para simulação das condições de evolução das temperaturas em túneis sob incêndio, como o tratado neste artigo, podem ser incorporados à prática de projeto de estruturas sob fogo, permitindo-se o desenvolvimento de análises refinadas com manutenção dos níveis de segurança e economia de sistemas de proteção.

## 1 INTRODUÇÃO

Catástrofes em túneis rodoviários envolvendo incêndio, como os famosos acidentes em *St. Gotthard* (2001), *Mont Blanc* (1999), *Tauern* (1999) e *Channel Tunnel* (1996), nos levaram a perceber o potencial de suas conseqüências. Destes acidentes citados, o que resultou no maior número de mortes foi o *Mont Blanc*, com 39 fatalidades (Colombo, 2001), seguidos pelo *Tauern* e *St. Gotthard*, com 12 (Colombo, 2001) e 11 (Bettelini *et al.*, 2003) fatalidades respectivamente. O acidente do *Channel Tunnel*, felizmente, não provocou nenhuma vítima (Colombo, 2001). Estes acidentes foram gerados por veículos de grande porte (*HGV – Heavy Goods Vehicles*), com uma alta taxa de liberação de calor, *HRR (Heat Release Rate)*, em torno de 300 MW em incêndios de duração de 3 a 13 horas (Ingason, 2004). No Brasil não existe ainda registro de ocorrência de incêndios deste porte em túneis rodoviários (Teixeira, 2002).

Para estudar o comportamento do incêndio em ambientes confinados é possível utilizar métodos computacionais como modelos de Dinâmica de Fluidos Computacional, *CFD (Computational Fluid Dynamics)* e também experimentos reais.

Nos últimos 15 anos foram realizados inúmeros experimentos de grande-escala em túneis com incêndios próximos aos reais. Para o estudo de incêndios de menor porte é possível citar os testes nos túneis *Bomlaffjord*, *Byffjord*, *Banehei* e *Hanekleiv*, todos na Noruega (Nilsen *et al.*, 2008). E para o estudo de incêndios de grande porte temos o EUREKA EU-499, no túnel *Repparfjord*, também na Noruega (Nilsen *et al.*, 2008).

Dentre os muitos trabalhos comparando os resultados de modelos *CFD* com resultados de experimentos reais, como também com resultados de outros métodos computacionais destacam-se os realizados por Jain *et al.* (2007), que faz uma comparação entre diferentes métodos de simulação numérica, Nilsen e Log (2008), fazendo uma comparação entre resultados de modelos com resultados experimentais, Migoya *et al.* (2008), comparando resultados de modelos simplificados de incêndio com resultados de modelos simulados em programas e de experimentos de grande escala e Migoya *et al.* (2010), que estuda a obtenção do *HRR* através de comparação com os métodos obtidos por cálculos com *CFD*.

O objetivo deste artigo é uma simulação numérica-computacional via *CFD*, utilizando o programa *Fire Dynamics Simulator (FDS)*, de incêndio em túneis rodoviários urbanos. Será apresentado um estudo de caso real de um túnel na cidade do Rio de Janeiro, utilizando um veículo de passeio para simular um incêndio de pequeno porte. A análise dos resultados visa estudar a temperatura do gás no túnel durante o acidente, para depois comparar estes resultados com curvas analíticas simplificadas.

No item 2 será apresentada a abordagem numérica, explicando o modelo matemático utilizado, para o cálculo em *CFD*. O principal objetivo deste estudo será retratado no item 3, como um estudo de caso, de forma a exemplificar os métodos descritos no item 2. Neste item serão também detalhados os modelos utilizados para a simulação, assim como as condições de contorno adotadas. Já no item 4 serão apresentados e analisados os resultados obtidos, e finalmente no item 5, as conclusões.

## 2 MODELO NUMÉRICO DE ANÁLISE CFD

### 2.1 Equações de Navier-Stokes

O programa utilizado, *FDS*, é um modelo baseado na Dinâmica de Fluidos Computacional, principalmente utilizado para simular situações de incêndio, e tem como principal função a análise do comportamento dos fluidos. Esta análise é feita através da resolução numérica das equações de *Navier-Stokes*, para baixas velocidades, voltada ao transporte de calor e com ênfase na dissipação da fumaça (McGrattan *et al.*, 2009). Para que a geometria dos elementos seja adaptada à malha ortogonal e tridimensional, é utilizada uma aproximação por diferenças finitas das derivadas parciais das equações de conservação da massa, movimento e energia e a solução é atualizada no tempo (McGrattan *et al.*, 2010). E para simular o comportamento da fumaça são utilizadas partículas Lagrangeanas.

As equações citadas acima, de *Navier-Stokes* e suas aproximações encontradas em Anderson *et al.* (1984), consideram o baixo número de *Mach* das aplicações (McGrattan *et al.*, 2010), e seguem abaixo.

Conservação de Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

Conservação do Movimento

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

Conservação da Energia (entalpia)

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}''' + \varepsilon \quad (3)$$

Equação de estado para o gás ideal

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (4)$$

Onde  $\rho$  é a densidade,  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade,  $\dot{m}_b'''$  é a taxa de produção de massa,  $p$  é a pressão,  $\mathbf{g}$  é o vetor gravidade,  $\mathbf{f}_b$  é o vetor de forças externas (excluindo gravidade),  $\boldsymbol{\tau}_{ij}$  é o tensor de tensão viscosa,  $h_s$  é a entalpia (função da temperatura),  $\dot{q}'''$  é a taxa de liberação de calor (*HRR*) por unidade de volume,  $\dot{\mathbf{q}}'''$  é o vetor fluxo de calor,  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura e  $\bar{W}$  é a massa molecular. Pode-se notar que este conjunto de equações diferenciais parciais consiste em seis equações e seis incógnitas todas em função do tempo e do espaço.

### 2.2 Heat Release Rate (*HRR*)

A *Heat Release Rate (HRR)*, ou Taxa de Liberação de Calor, é uma função que relaciona a quantidade de calor liberada pelo incêndio em função do tempo decorrido. Na prática, esta grandeza define o tamanho do incêndio (NFPA, 2002). Se esta função já for previamente conhecida, é possível utilizar apenas esta curva como dado de entrada para o programa e

simular o incêndio desejado.

Neste estudo de caso foi simulado um incêndio de pequenas proporções, utilizando uma curva de *HRR* referente a um carro de passeio de pequeno porte. Esta curva foi retirada de um estudo feito por Yan *et al.* (2009).

Para realizar o estudo citado acima foram conduzidos experimentos de grande escala no *Xianmen Road Tunnel*, localizado na cidade *Nanjing* na China, que tem comprimento confinado total de 1410 metros, 5.75 metros de altura, 12.35 metros de largura e sujeito a apenas ventilação natural feita através de galerias de ventilação (*shafts*). Foram utilizados *pool fires* com óleo diesel, cujo volume gera uma quantidade de calor equivalente a um carro de passeio de pequeno porte, como fonte de incêndio, e a temperatura da fumaça resultante foi medida através de sensores ao longo do túnel. A partir das medições efetuadas foi possível traçar a curva *HRR* x Tempo ilustrada na figura 1 abaixo.

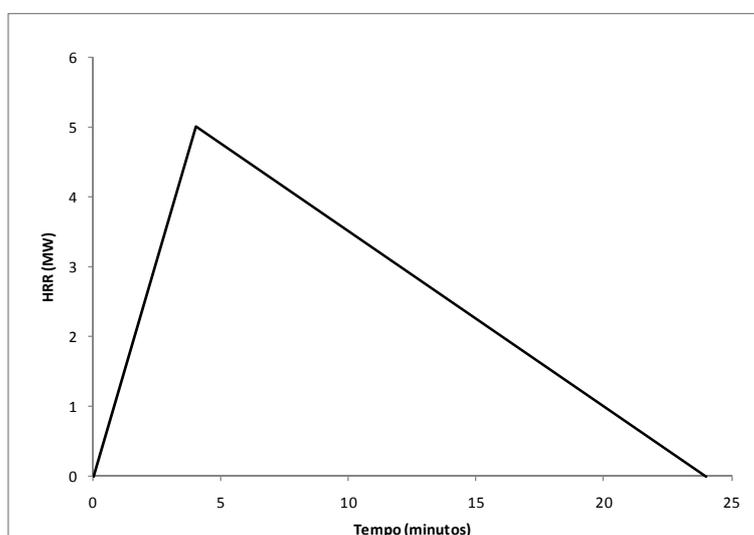


Figura 1 – Gráfico *HRR* x Tempo para veículo de passeio de pequeno porte.

O valor de *HRR* máximo obtido do gráfico, 5 MW, está compatível com valores indicados pela literatura, retiradas dos estudos de Li e Chow (2003) e de Migoya *et al.* (2010), mostrados nas tabelas 1 e 2 respectivamente. Em ambas são apresentados exemplos citados pelo *PIARC* (*Permanent International Association of Road Congress*).

Tabela 1 – Tabela adaptada: *HRR* para o dimensionamento de incêndios.

Literatura	Incêndio	<i>HRR</i> (MW)	Dimensão
<b>Heselden (1976)</b>	Automóvel	3	Dimensões Horizontais: 1.5 x 4 m
	Van	10	Dimensões Horizontais: 2 x 6 m
<b>PIARC (1987)</b>	Carro de Passageiro	5	Poça de gasolina equivalente: 1.5 x 4 m
	Ônibus/Caminhão	20	Poça de gasolina equivalente: 2 x 6 m
	Poça de gasolina	100	Poça de gasolina equivalente: 2.5 x 10 m

Tabela 2 –Tabela adaptada: Valores estimados de HRR para veículos rodoviários.

Tipo de Veículo	HRR (MW)	Comentários
Carro de Passageiro	2.5 - 5	Cargas de incêndio utilizadas em experimentos na Finlândia.
2 - 3 Carros	8	
Van	15	
Ônibus	20	Cargas de incêndio utilizadas no experimento EUREKA.
Caminhão	20 - 30	Veículo desprovido de cargas inflamáveis.
HGV	30	
Tanque de Petróleo	300	Tanque carregado com 50 m <sup>3</sup> de gasolina.

### 3 ESTUDO DE CASO

Para ilustrar os métodos descritos acima será apresentado um estudo de caso real de um túnel na cidade do Rio de Janeiro, cujas características foram aproximadas para simplificar a análise. O túnel escolhido foi o Túnel Rebouças, que faz a ligação entre os bairros Rio Comprido, Cosme Velho e Lagoa.

#### 3.1 Túnel Rebouças

O Túnel Rebouças foi projetado durante o governo de Carlos Lacerda e inaugurado em três de outubro de 1967 e foi projetado a fim de ligar as Zonas Sul e Norte da cidade diretamente, evitando o Centro da cidade. A obra de arte consiste em dois túneis, André Rebouças, no sentido Sul-Norte e Antônio Rebouças no sentido Norte-Sul, ilustrados na figura 2. Cada túnel é dividido em duas galerias denominadas R1 e L1 e R2 e L2, correspondendo aos Túneis Andre Rebouças e Antônio Rebouças respectivamente. O primeiro conjunto de galerias, R1 e R2, liga os bairros Rio Comprido e Cosme Velho e o segundo conjunto, L1 e L2, liga os bairros Cosme Velho e Lagoa.

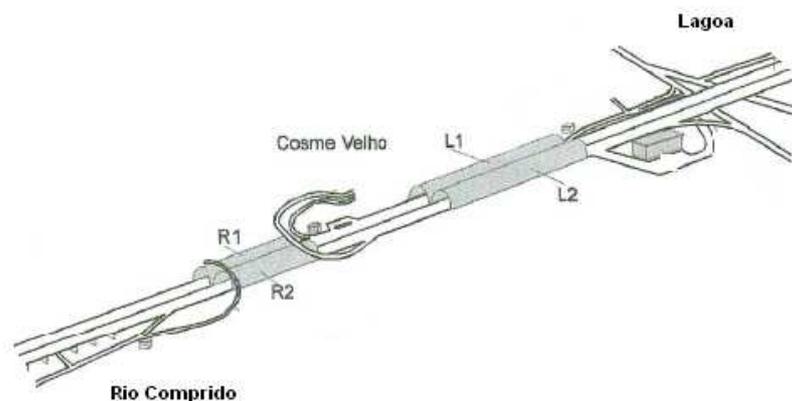


Figura 2 – Túnel Rebouças: localização e galerias

O comprimento total do túnel é de 2800 metros, 760 metros nas galerias R1 e R2 e 2040 metros nas galerias L1 e L2, e totalizando uma escavação de rocha de 5600 metros. Ambas as galerias possuem três faixas de trânsito, com largura total de nove metros, porém a geometria de suas seções transversais difere significativamente, como mostrada na figura 3. As galerias R1 e R2 têm seção transversal com perfil parabólico, 7.10 metros de altura, 13.18 metros de

largura e área aproximada de 70.00 m<sup>2</sup>. E as galerias L1 e L2 tem perfil semi-circular, 8.60 metros de altura e 11.90 metros de largura, totalizando aproximadamente 100.00 m<sup>2</sup>.

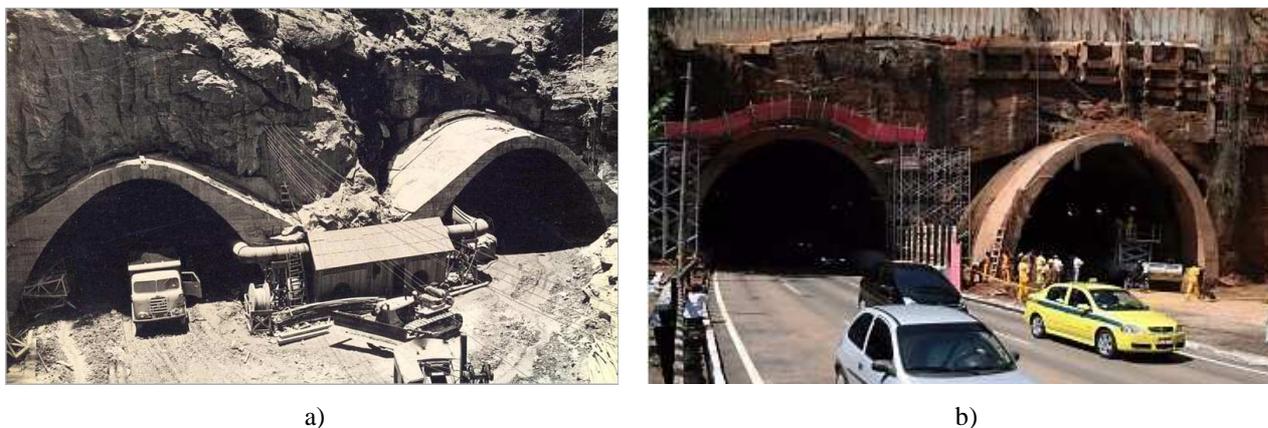


Figura 3 – Túnel Rebouças: a) Galerias R1 e R2 e b) Galerias L1 e L2

Em ambas as galerias foram projetados sistemas de ventilação longitudinal. Para as galerias R1 e R2 este sistema está localizado em seu ponto mais alto, no centro, e ao longo de toda sua extensão, totalizando 8 ventiladores em cada galeria. Para as outras, L1 e L2, os ventiladores estão locados à direita e à esquerda intercaladamente, também ao longo de toda sua extensão. O número total de ventiladores varia da L1 para a L2, 50 e 23 respectivamente, devido à declividade de 2% existente nestes trechos do túnel, sendo que a L1 é um aclave e a L2 um declive. As galerias R1 e R2 são planas. Além deste sistema dimensionado no projeto inicial, foram acrescentados recentemente na galeria L1 8 ventiladores turbo, com o dobro da potência.

### 3.2 Modelo FDS

Neste trabalho foi modelado um trecho de 15 metros de túnel, cuja seção transversal é uma aproximação das seções transversal de ambas as galerias, definida como semi-circular, com 9 metros de largura e 5 metros de altura. Para a simulação do incêndio de um carro de pequeno porte foi considerada a combustão de uma área unitária, liberando a quantidade de calor definida por Yan *et al.* (2009) e cujo o centro se encontra nas coordenadas  $x = 0.00$ ,  $y = 12.00$  m e  $z = 0.10$  m. A figura 4 abaixo define os eixos adotados ao longo deste trabalho, assim como a geometria das seções transversal e longitudinal, e também a localização e a geometria da área utilizada como foco de incêndio.

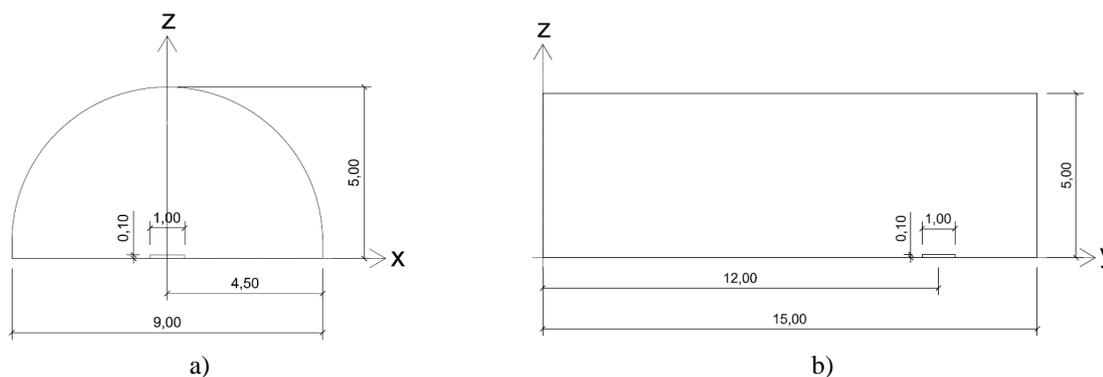


Figura 4 – Localização e geometria (cotas em metros): a) seção transversal e b) seção longitudinal

Para modelar o túnel foi utilizada uma malha de elementos finitos com 810000 elementos e o processamento foi feito em um computador com sistema paralelo 2 quadcore (8 nós). Como condição de bordo foi considerada uma livre circulação de ar, interna e externamente, e para fins de simplificação não foi levado em consideração as ventilações natural e mecânica do túnel, portanto o comportamento do gás será devido apenas à variação de temperatura resultante do incêndio.

Foram escolhidos alguns pontos para facilitar a interpretação dos resultados ao longo da análise. Estes pontos encontram-se em 6 seções, distando 2 metros entre si a partir da seção a dois metros do início até a seção do foco do incêndio, de forma a avaliar o comportamento da temperatura em toda a extensão do túnel. E em cada seção temos 4 pontos, possibilitando também a avaliação da temperatura ao longo da altura do túnel, começando pela altura média de uma pessoa, 1,75 m, até uma altura próxima ao topo, 4,80 m. A figura 5 mostra o posicionamento destes pontos em relação aos eixos adotados.

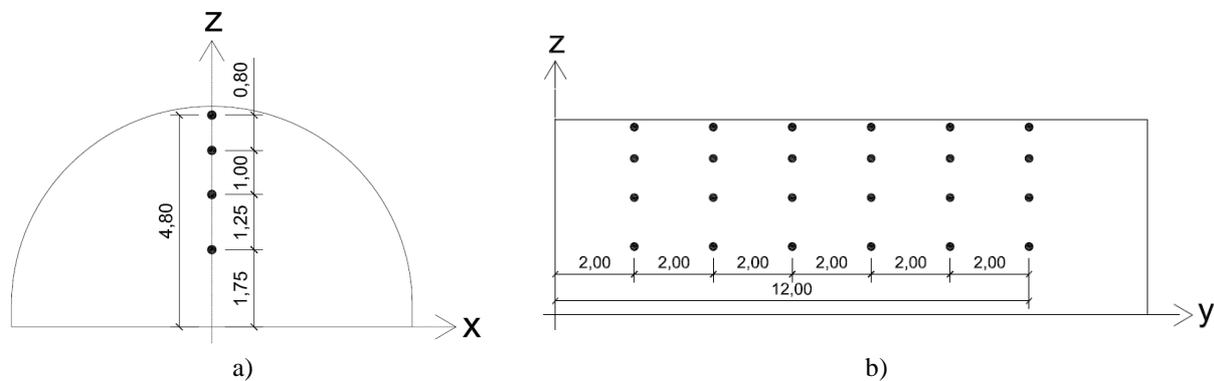


Figura 5 – Pontos de medição (cotas em metros): a) seção transversal e b) seção longitudinal

### 3.3 Curvas Temperatura -Tempo Internacionais

De acordo com o Eurocode 1 (2002) existem três curvas normativas de Temperatura X Tempo. São estas as curvas *Standard Temperature-Time Curve*, também chamada de Curva Incêndio Padrão pela NBR 14432:2001 (2001), *External Fire Curve (Curva de Incêndio Externo)* e *Hydrocarbon Curve (Curva de Hidrocarbonetos)*. Abaixo estão explicitadas as equações que regem o comportamento destas curvas, seguido pela plotagem sobreposta das mesmas no gráfico da figura 6.

Curva Incêndio Padrão

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (5)$$

Curva de Incêndio Externo

$$T_g = 660(1 - 0.687 \cdot e^{-0.32t} - 0.313 \cdot e^{-3.8t}) + 20 \quad (6)$$

Curva de Hidrocarbonetos – Curva H

$$T_g = 1080(1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t}) + 20 \quad (7)$$

Onde  $T_g$  é a temperatura do gás no ambiente de incêndio (interno ou externo) e  $t$  é tempo decorrido desde o início do mesmo.

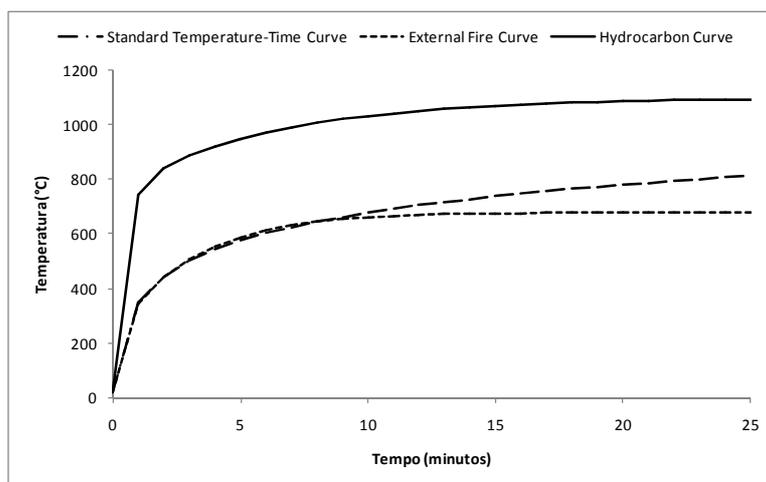


Figura 6 – Gráfico Temperatura-Tempo: Curvas normativas.

Dentre as curvas apresentadas, a mais severa é a Curva H, adotada quando o combustível em questão é composto por materiais altamente inflamáveis (FITESA, 2004), portanto será esta a curva utilizada para analisar os resultados obtidos através do modelo estudado. As demais curvas, a Curva Incêndio Padrão, adotada quando o combustível é composto de materiais celulósicos (FITESA, 2004), mais utilizada para incêndios em edifícios, e a Curva de Incêndio Externo, utilizada para incêndios em áreas externas.

## 4 RESULTADOS

Neste item serão apresentados e analisados os resultados obtidos após a simulação numérica, através do modelo *CFD*.

### 4.1 *HRR* – Heat Release Rate

Para verificar a compatibilidade da saída do modelo com os dados de entrada, foi plotada a curva de *HRR* gerada pelo programa e comparada com a curva *HRR* utilizada para gerar o incêndio. Como esperado as duas curvas apresentam o mesmo comportamento, como mostra a figura 7 abaixo.

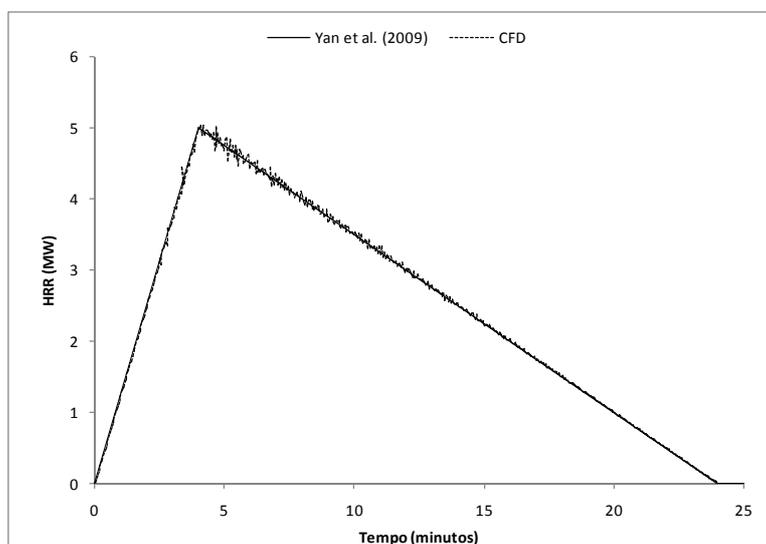


Figura 7 – Gráfico comparativo *HRR* x Tempo para veículo de passeio de pequeno porte.

## 4.2 Temperatura

É esperado um padrão de comportamento para a evolução da temperatura em função do tempo e do espaço. Sabemos que devido à densidade dos gases, que quanto mais quente menor, portanto mais leve este se torna, os gases mais quentes tendem a ocupar os espaços mais altos. Outro fator importante é que no decorrer do tempo, estes gases quentes perdem calor para o ambiente, que se encontra menos quente, e por isto prevemos uma diminuição gradual da temperatura. As figuras 8 e 9 ilustram a evolução do calor em função do tempo e do espaço para o foco do incêndio, nas posições  $y = 12.00$  m e  $x = 0.00$  m respectivamente, mostrando um comportamento dentro do padrão esperado.

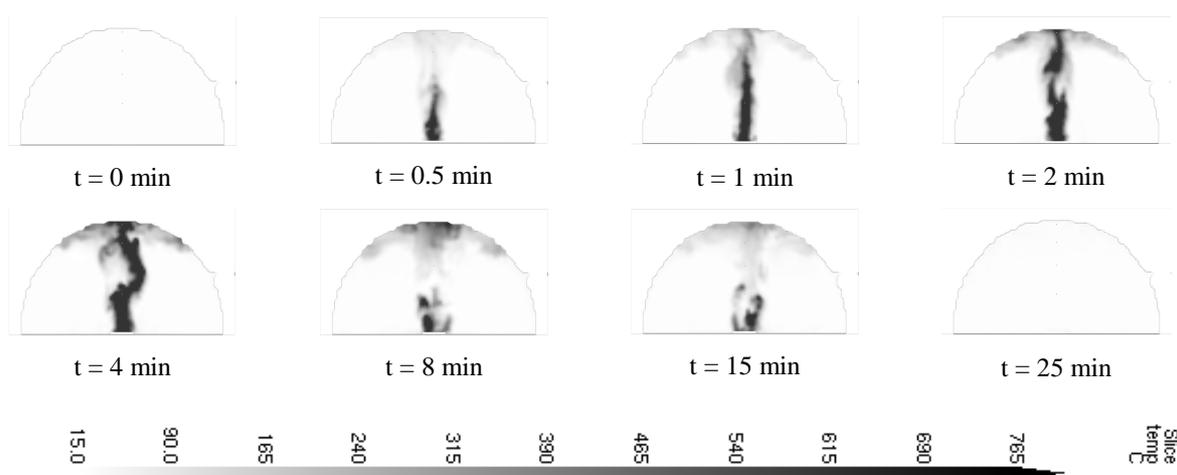


Figura 8 – Evolução do Calor na seção transversal  $y = 12.00$  m, para  $t$  variando entre 0 e 25 minutos.

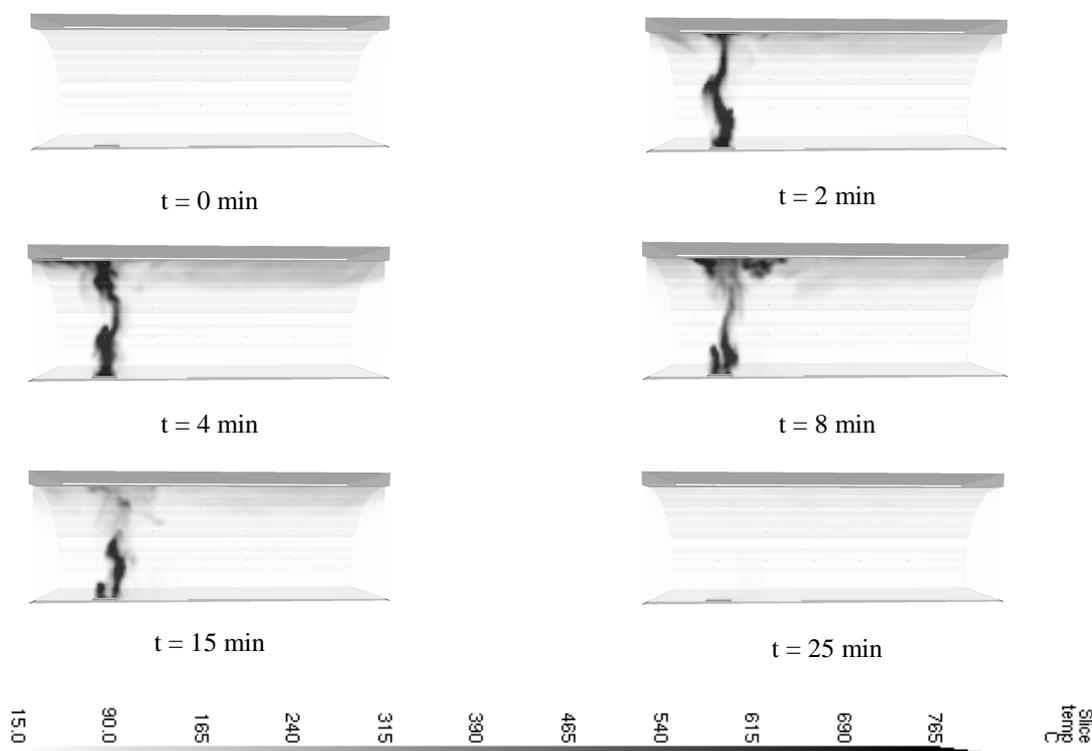


Figura 9 – Evolução do Calor na seção longitudinal  $x = 0.00$  m, para  $t$  variando entre 0 e 25 minutos.

Foram traçados três conjuntos de gráficos, figuras 10 a 12, para ilustrar a evolução da temperatura mostrada acima em determinados pontos do modelo. Para o primeiro (figura 10) foi utilizada a seção  $y = 12.00$  m, foco do incêndio, para descrever a variação da temperatura em função do tempo decorrido para diferentes valores de  $z$ . Já para os outros dois foi analisado o resultado da variação em  $y$  para valores definidos de  $z$ , 1.75 m no segundo (figura 11) e 4.80 m no terceiro (figura 12), utilizando a seção  $x = 0.00$  m. Foram escolhidos esses dois valores de  $z$  por representarem os pontos de maior significado físico, enquanto  $z = 1.75$  m corresponde à altura de uma pessoa,  $z = 4.80$  m corresponde ao ponto mais próximo do topo da estrutura. Em todos os gráficos foi plotada a Curva H, para fins comparativos.

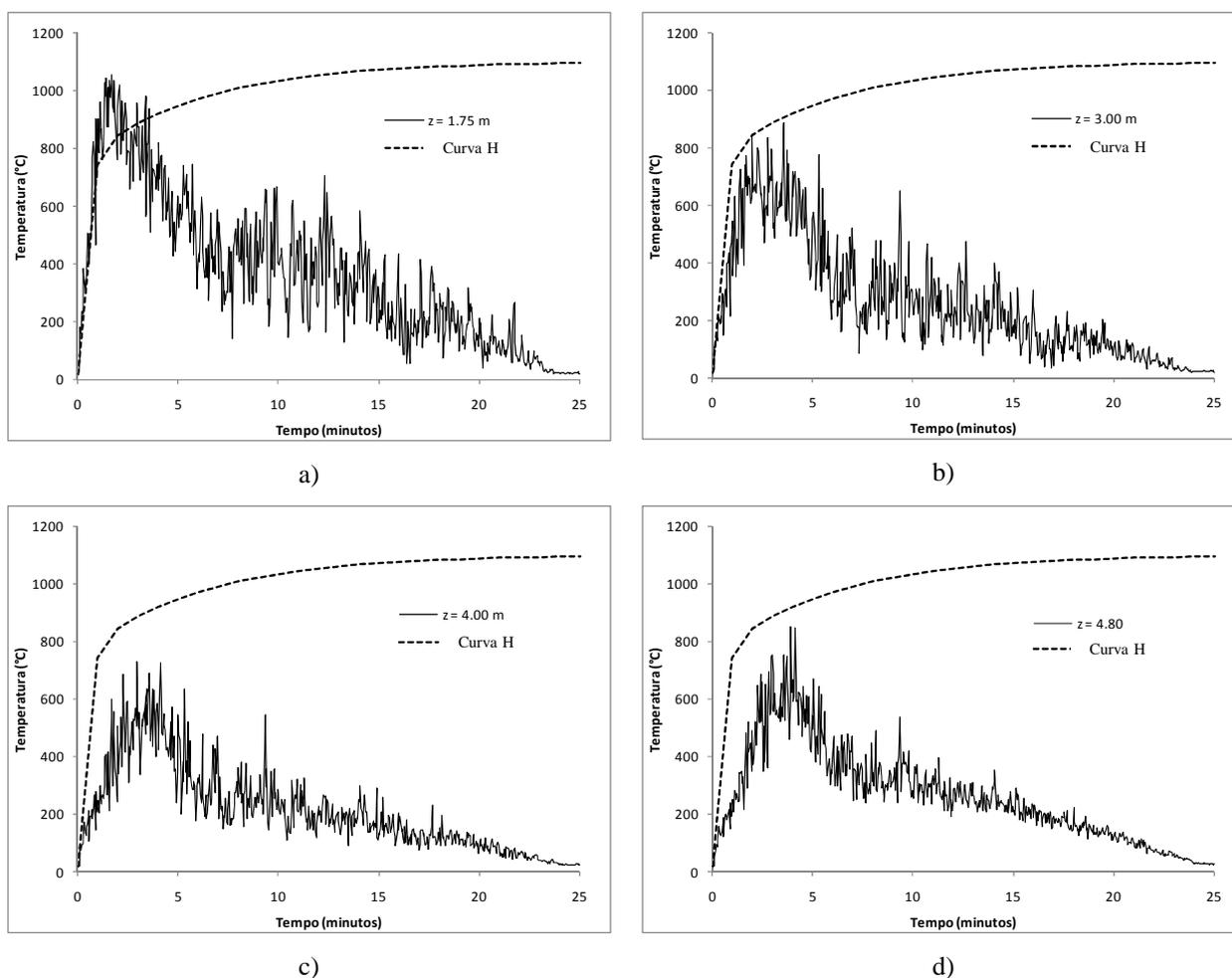


Figura 10 – Gráficos Temperatura-Tempo para  $y = 12.00$  m: a)  $z = 1.75$  m; b)  $z = 3.00$  m; c)  $z = 4.00$  m e d)  $z = 4.80$  m.

Observa-se nos gráficos acima que as curvas Temperatura-Tempo obtidas do modelo CFD encontram-se todas abaixo da Curva H, exceto para os primeiros 5 minutos do incêndio em  $z = 1.75$  m, alcançando valores superiores a  $1000^{\circ}\text{C}$ . Os gráficos dos 4 pontos tem formas semelhantes, atingem um pico no início e diminuem a temperatura gradualmente, porém o valor do pico é decrescente em função da altura assim como o tempo em que este ocorre é crescente em função da mesma.

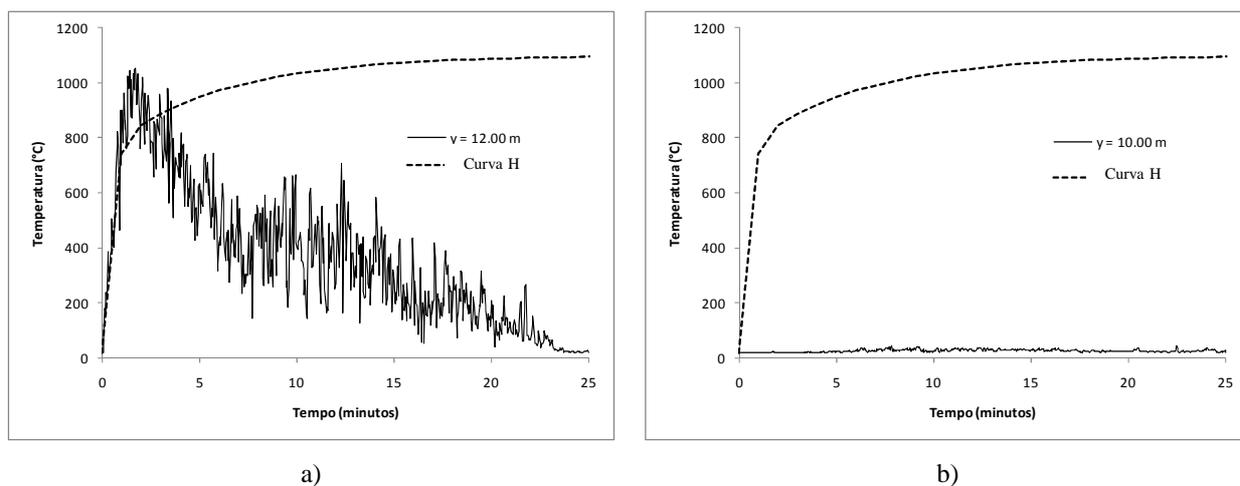


Figura 11 – Gráficos Temperatura-Tempo para  $z = 1.75$  m: a)  $y = 12.00$  m e b)  $y = 10.00$  m.

A figura acima representa as curvas Temperatura-Tempo na altura de uma pessoa média, e percebe-se que a única seção crítica é a seção do foco do incêndio,  $y = 12$  m, pois já na próxima seção,  $y = 10$  m, os valores caem para temperaturas inferiores a  $50^{\circ}\text{C}$  estabilizando-se gradativamente em  $20^{\circ}\text{C}$ .

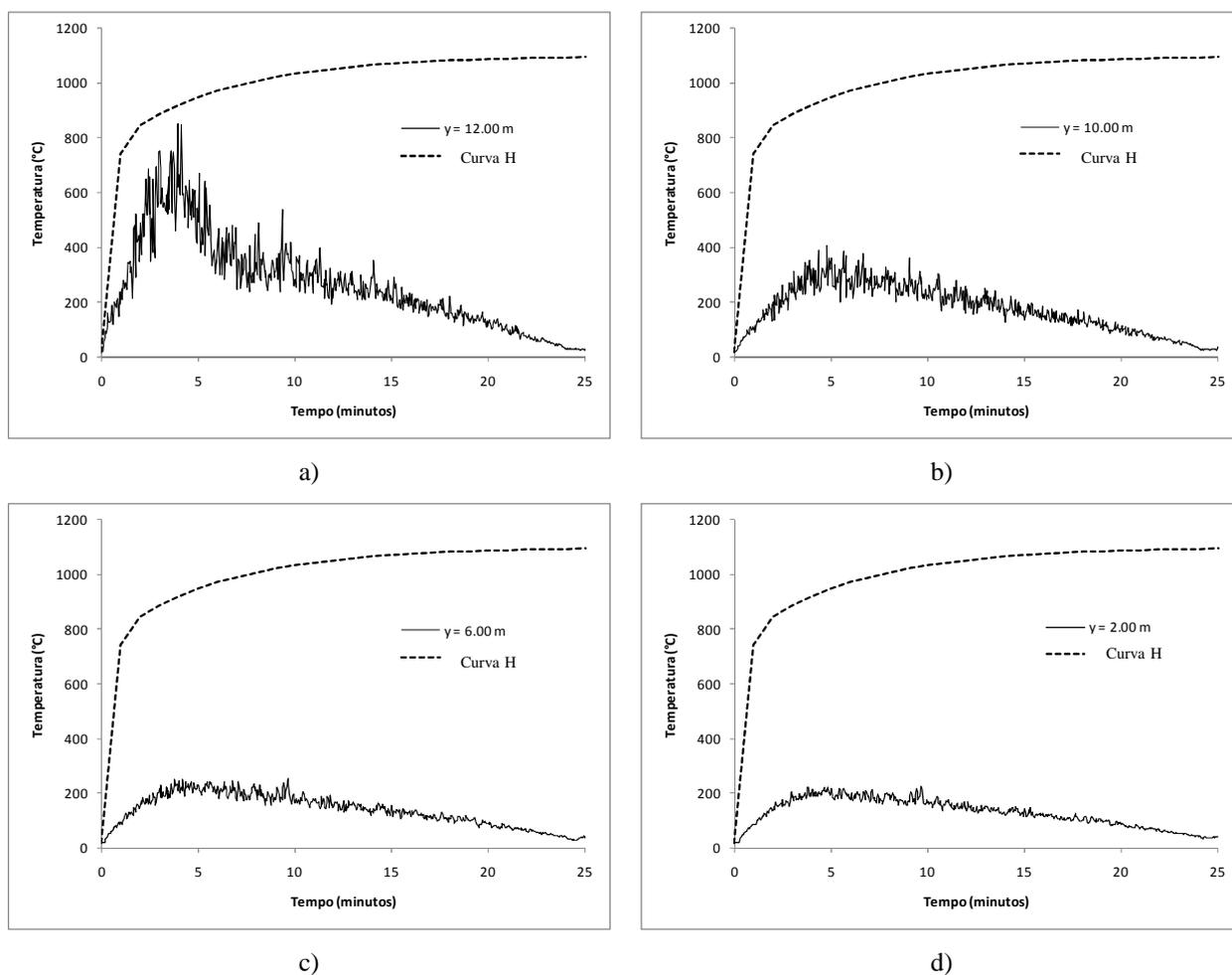


Figura 12 – Gráficos Temperatura-Tempo para  $z = 4.80$  m: a)  $y = 12.00$  m; b)  $y = 10.00$  m; c)  $y = 6.00$  m e d)  $y = 2.00$  m.

Nesta última figura, é possível perceber um comportamento semelhante ao da figura 10, porém as curvas têm variação mais suave. As temperaturas atingem valores máximos em torno de 900°C para a seção do foco do incêndio, e valores de até 400°C para as demais seções, variando gradualmente entre as curvas  $y = 10.00$  m e  $y = 2.00$  m.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta resultados de um modelo de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), através do programa *FDS*, com aplicabilidade em um túnel real, cujo principal objetivo é o estudo da evolução da temperatura no tempo e no espaço em um ambiente confinado na ocorrência de um incêndio. Os resultados numéricos obtidos são comparados com a Curva H, a *Hydrocarbon Curve* do Eurocode 1, onde observa-se que para esta seção do túnel analisado a curva normativa está muito a favor da segurança.

Entretanto, o estudo aqui realizado, assim como as análises, ainda é um esboço do estudo final em desenvolvimento que considera as características do túnel mais próximas à realidade, para gerar resultados mais específicos e analisar também outros fatores, como a toxicidade dos gases presentes no incêndio.

É nosso entendimento que modelos de análise de desempenho como o apresentado podem contribuir para a compreensão mais ampla das conseqüências de incêndios em ambientes confinados, permitindo-se a proposição de sistemas mais apropriados de segurança e sinalização.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, *NBR 14432:2001 – Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.
- Anderson, D. *et al.*, *Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, 1984.
- Aralt, T.T. e Nilsen, A.R., Automatic fire detection in road traffic tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 24: 75-83, 2009.
- Bettolini, M. *et al.*, The Fire in the Gotthard Tunnel of October 23, 2001. *Lombardi Engineering Ltd.*, 102.2-R-150, 2003.
- CEN, *Hydrocarbon Curve, Section 3.2.3., Eurocode 1 – Actions on Structures Parts 1-2: General Action – Actions on Structures Exposed to Fire*. EN 1991-1-2, Brussels, 2002.
- Colombo, G.A., Lessons Learnt from Tunnel Accidents. *EUR Report*, 2001.
- FITESA, *Efeito “Anti-spalling” das Fibras de Polipropileno*. Boletim Técnico 6, 2004.
- Ingason, H., Catastrophic Tunnel Fires: What have we Learned? *International Symposium of Tunnel Safety and Security*, Nov 16-17, W DC, USA, 2004.
- Jain, S. *et al.*, Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions. *Tunneling and Underground Space Technology*, 23:160-170, 2008.
- Li, Jojo S.M. e Chow, W.K., Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18: 435-452, 2003.
- McGrattan, K. *et al.*, *Fire Dynamics Simulator: User’s Guide*, Versão 5. NIST – National Institute of Standards and Technology, USA, 2009.
- McGrattan, K. *et al.*, *Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide*, Versão 5. NIST – National Institute of Standards and Technology, USA, 2010.
- Migoya, E. *et al.*, A simplified model of fires in road tunnels. Comparison with three-dimensional models and full-scale measurements. *Tunneling and Underground Space*

- Technology*, 24: 37-52, 2008.
- Migoya, E. *et al.*, Determination of the heat release rate inside operational road tunnels by comparison with CFD calculations. *Tunneling and Underground Space Technology*, doi:10.1016/j.tust.2010.05.001, 2010.
- Nilsen, A.R. e Log, T., Results from three models compared to full-scale tunnel fire tests. *Fire Safety Journal*, 44: 33-49, 2008.
- NFPA, *Handbook of Fire Protection Engineering*, Ed. 3. National Fire Protection Association, 2002.
- Teixeira, J., Novos Túneis Contam com Recursos Prevencionistas de Última Geração. *Revista Incêndio* n° 16, 2002.
- Yan, T. *et al.*, Full-scale experimental study on smoke flow in natural ventilation road tunnel fires with shafts. *Tunneling and Underground Space Technology*, 24: 627-633, 2009.

### **AGRADECIMENTOS**

Aos Engenheiros Ruy Moreira Filho e Ricardo Motta, da Primeira Divisão de Vias Especiais da Coordenadoria de Vias Especiais, pela gentil disponibilização de informações referentes ao Eixo Rodoviário São Cristóvão – Lagoa Rodrigo de Freitas, permitindo um melhor desenvolvimento deste trabalho.

À ENGEVIX ENGENHARIA SA, em especial aos Engenheiros Anderson Marques Nacif e Sérgio L. Freitas Capellão, pelo apoio e cooperação durante as pesquisas referentes à produção deste artigo.