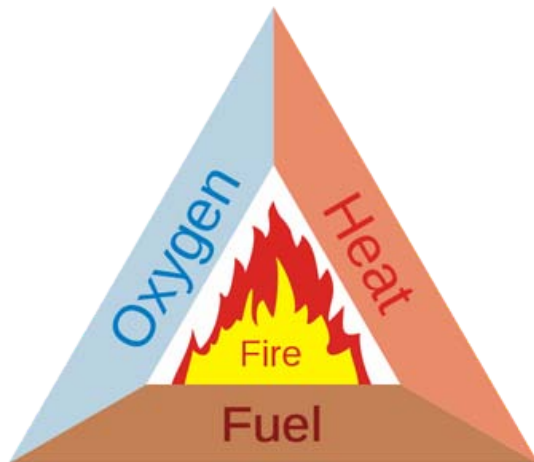




Modelli CFD per simulazione incendio in galleria

Alessio Frassoldati, Marco Derudi

Politecnico di Milano, Dip. di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G. Natta”



FIRE

Fenomenologia complessa:

- reazioni chimiche
- fenomeni di trasporto
- irraggiamento
- sistema multi-fase e multi-scala
- Reazione incontrollata

COMBUSTION

- caratteristiche fisico-chimiche del combustibile
- cinetica dettagliata di combustione e/o pirolisi
- interazioni cinetica-turbolenza





BOUNDARY CONDITIONS

Unconfined Fires
Room/enclosures Fires
Tunnel Fires

Wind effect
Walls effect
Obstacles

TUNNEL FIRES

mine networks,
road tunnels,
rail tunnels, subways

Accident	Country	Year	Casualties
Zasyadko mine	Ukraine	2001	37
Gotthard tunnel	Switzerland	2001	11
Mont Blanc Tunnel	France	1999	39
Tauern Tunnel	Austria	1999	12
Kaprun Tunnel	Austria	2000	155
King's Cross Underground Station	UK	1987	31

Drysdale, « An introduction to Fire Dynamics », Wiley , 1999
Carvel et al, «The Handbook of Tunnel Fire Safety», 2005



■ ANALISI DELLE CONSEGUENZE in ambienti confinati

VITE UMANE
DANNI STRUTTURALI
DISCONTINUITA' OPERATIVE
DANNI ECONOMICI

Carvel et al, «The Handbook of Tunnel Fire Safety», 2005

Rilascio calore
Propagazione Incendio
Dispersione gas tossici
associati al movimento fumi

■ DESIGN

VENTILAZIONE
SISTEMI DI PREVENZIONE/PROTEZIONE
DEFINIZIONE VIE DI FUGA
GESTIONE EMERGENZE
.....

CASE - SPECIFIC

Sperimentazioni ad-hoc



Modelli predittivi



Verificare l'efficienza del sistema di ventilazione in un tunnel stradale e misurare dati sperimentali utili a convalidare/migliorare modelli CFD

- Geometria Complessa
ostacoli, condizioni contorno, posizionamento incendio...
- Ventilazione
naturale/forzata, velocità critica, backlayering, dinamica
- Dispersione fumi





Scenario incidentale: incendio di un veicolo pesante

Scenario riproduce le condizioni di una situazione emergenziale reale, inclusa la **variazione della ventilazione longitudinale** a seguito dello sviluppo dell'incendio

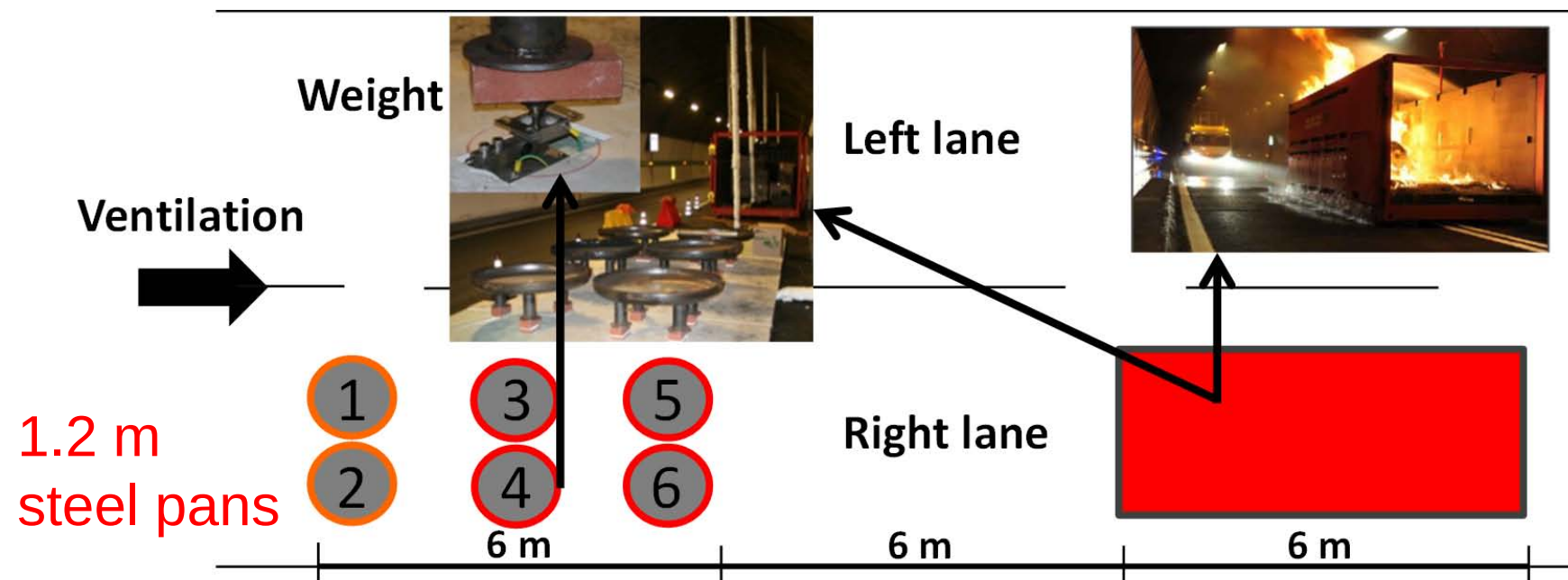


Cassone usato per riprodurre l'effetto aerodinamico del veicolo pesante sul movimento dei fumi.

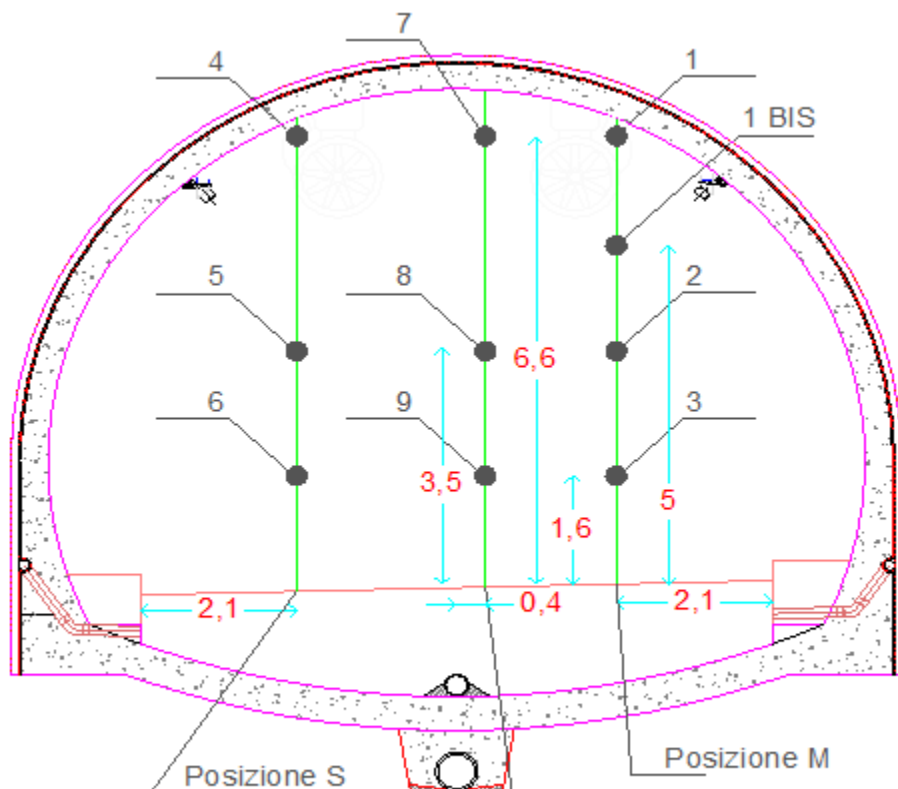
Sei incendi con pozze da 1.2 m di gasolio (~15 MW fire) => verifica sistema di ventilazione e valutazione della velocità critica backlayering.



Scenario: incendio parte terminale veicolo pesante



Pozze rosse (da #3 a #6, valle) caratterizzate da elevata potenza HRR;
Peso della pozza #4 misurato per valutare perdita peso e quindi potenza sviluppata.



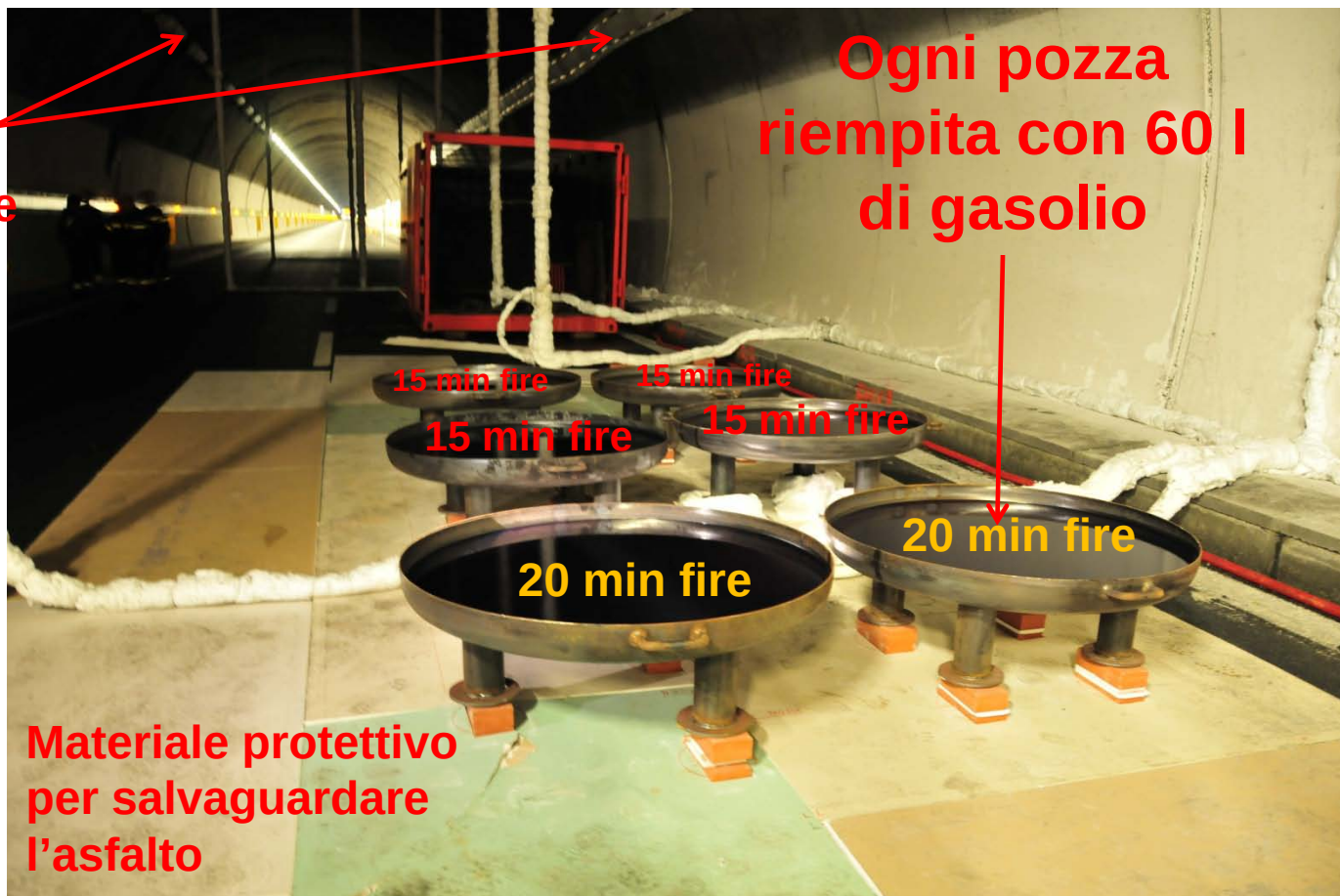
Measurement Locations	
A	- 440 m
B	- 50 m
C	- 20 m
D	-5 m
E	0 m (fire)
F	+ 3,5 m
G	+ 7 m
H	+ 9 m
I	+ 15 m
L	+ 30 m
M	+ 50 m
N	+ 100 m
O	+ 150 m
P	+ 195 m



- Velocità e temperatura
- composizione (O₂; CO;)
- Particolato e PM distribuzione.
- opacità



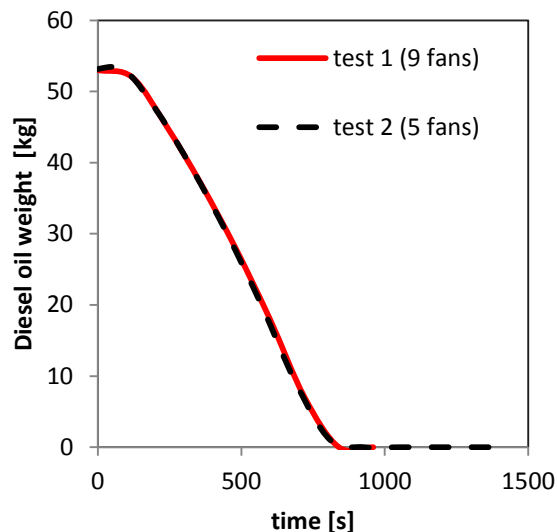
1. Luci, cavo radiante e altre infrastrutture protette con materiale isolante resistente a più di 1000 °C



La galleria è rimasta aperta al traffico anche durante la fase di cantierizzazione necessaria a installare le attrezzature di supporto, l'isolante e gli strumenti di misura. (solo corsia di marcia è stata chiusa in anticipo).

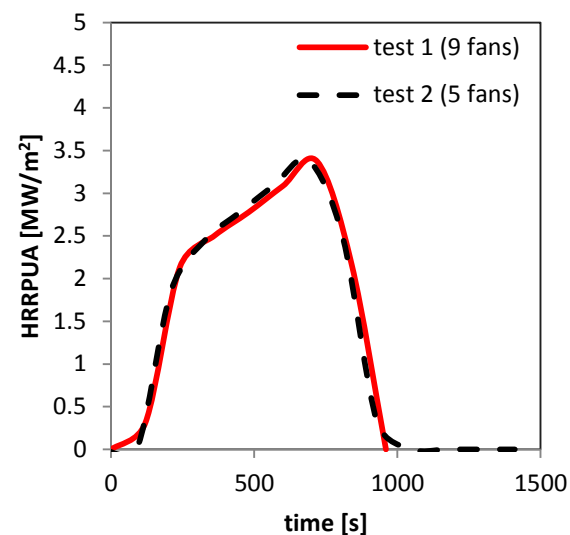
⇒ **Rapida preparazione e smontaggio delle attrezzature**

⇒ **Necessità di salvaguardare le infrastrutture e evitare qualsiasi danno**

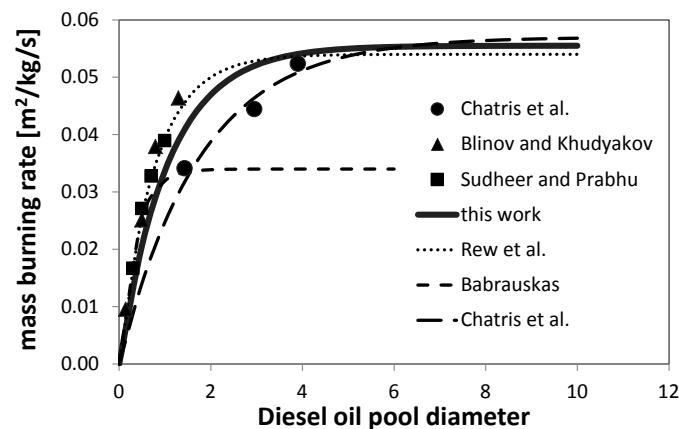
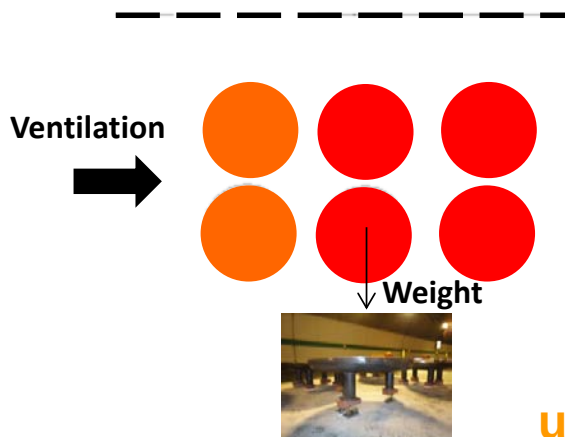


$$\Delta H_c = 42000 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_c = 0.9$$



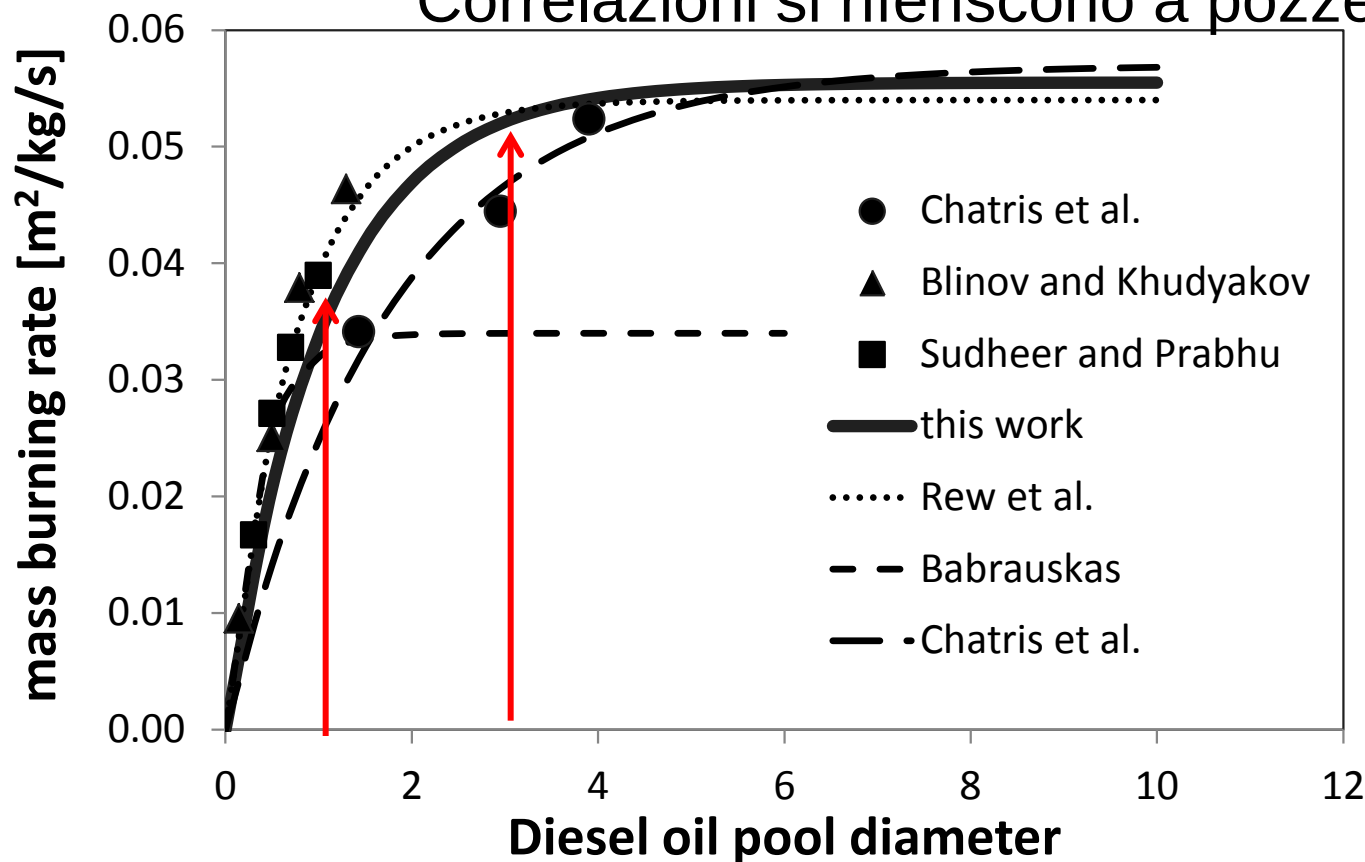
Due esperimenti con massimo HRR ~15.6 MW. **Effetto ventilazione trascurabile**



upstream pools fire ~20 min: 1.8 MW (usando correlazione)
downstream pools fire ~15 min: 3.0 MW



Correlazioni si riferiscono a pozze isolate



H. Ingason, SP
Technical Research
Institute of Sweden
Report P801596 (2008).

Diesel oil pool fire



Table 1. Parameters of the $m = m_{\infty} \cdot (1 - e^{-k'D})$ correlation for diesel oil pool fires.

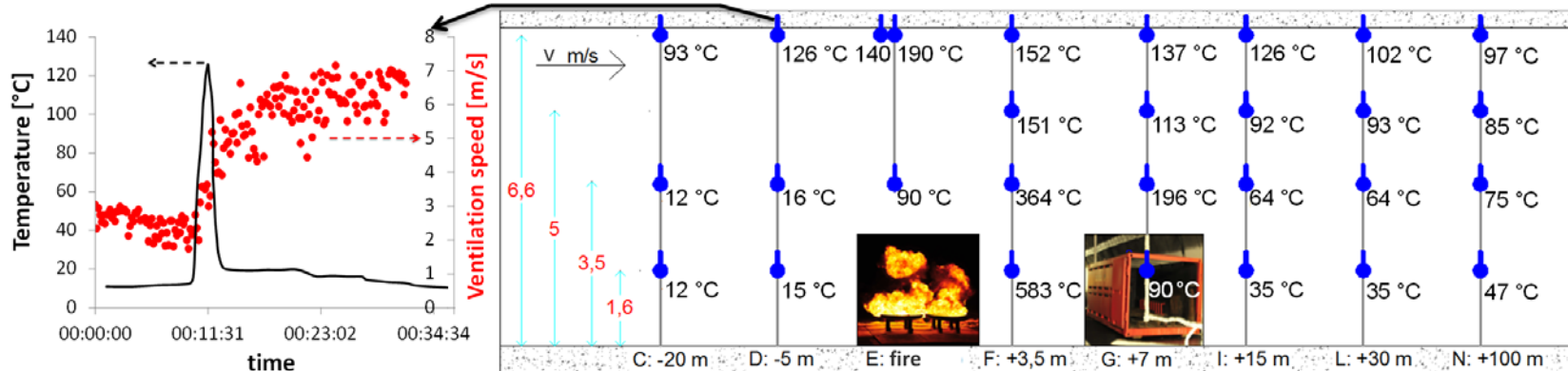
$m_{\infty} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	k'	Reference
0.0555	0.935	Used in this work
0.054	1.30	Rew et al.
0.057	0.57	Chatris et al.
0.034	2.8	Babrauskas

$$6 \times 1.2 \text{ m} \Rightarrow 1 \times 2.94 \text{ m}$$

$$10.6 \text{ MW} \Rightarrow 14.8 \text{ MW}$$



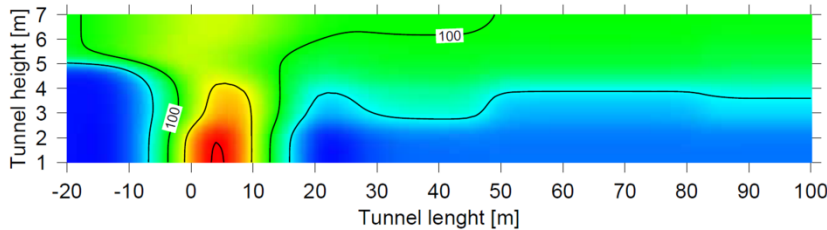
Backlayering dei fumi prima della attivazione della ventilazione di emergenza





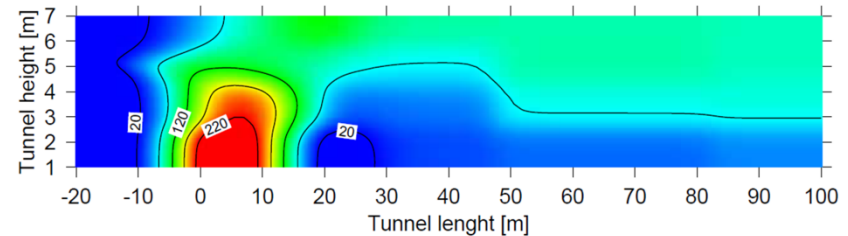
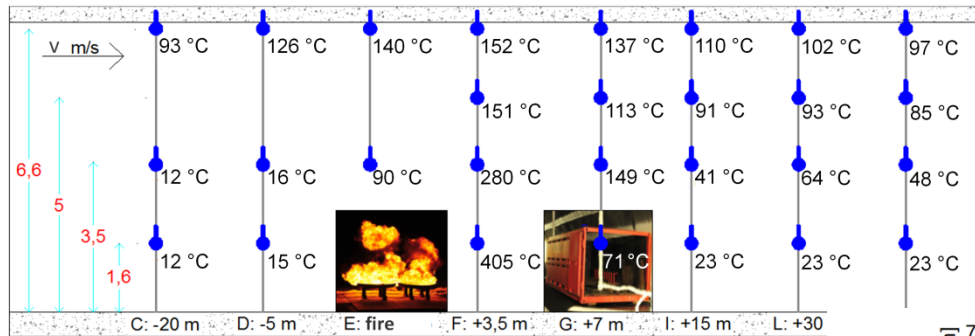
Distribuzione temperatura piano longitudinale e effetto della ventilazione

13

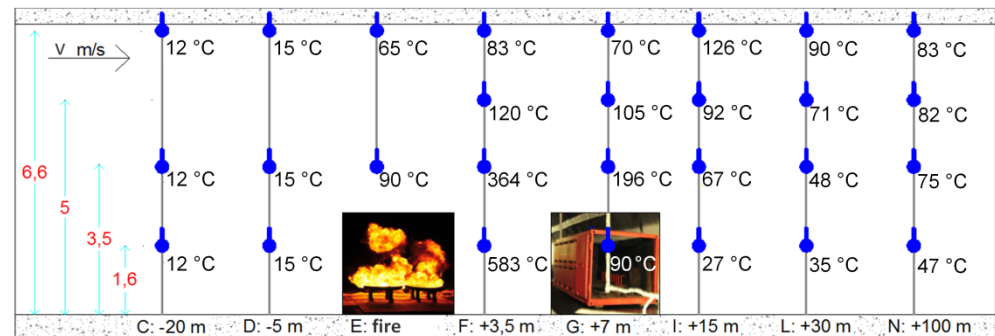


Piano longitudinale (marcia)
test #1

Bassa ventilazione,
condizioni operative normali
($v=2.2$ m/s)



Ventilazione
emergenziale @
steady-stazionaria,
9 ventilatori attivi
($v=7.1$ m/s)

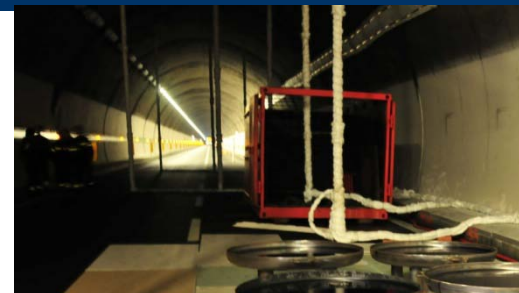
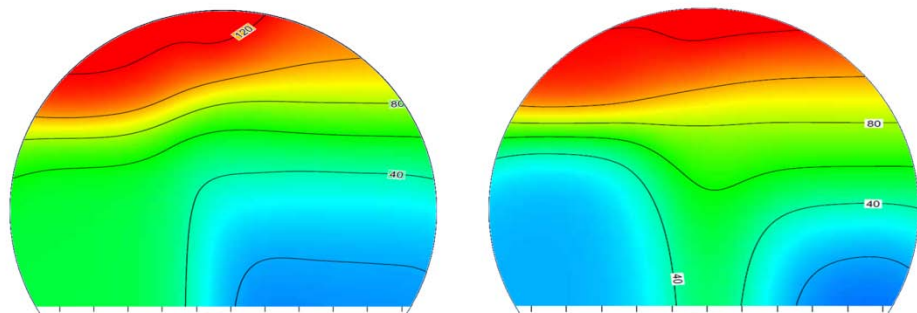




Distribuzione trasversale di temperatura a valle dell'incendio

14

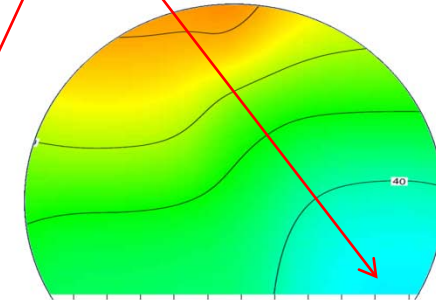
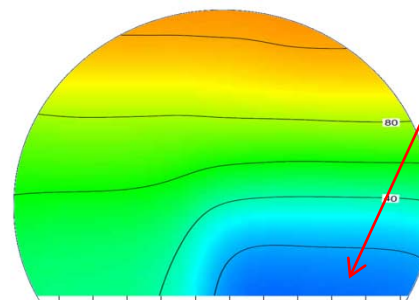
Piano a +15 m



Scia del cassone

$V=2.2 \text{ m/s}$

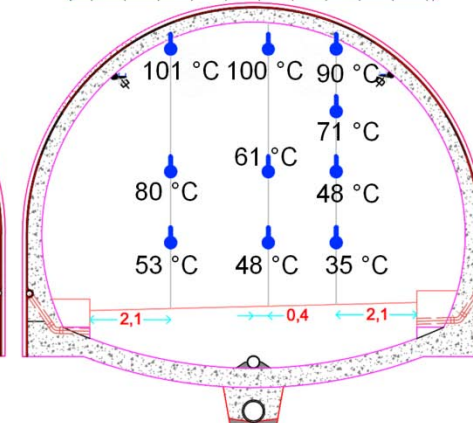
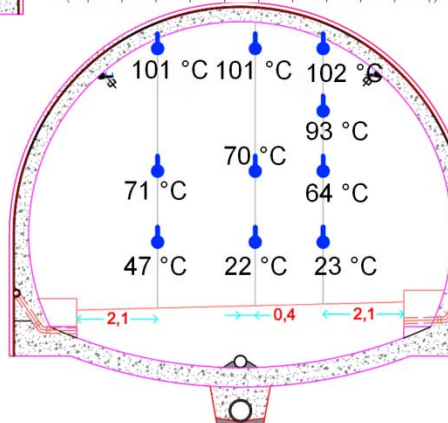
$V=7.1 \text{ m/s}$



$V=2.2 \text{ m/s}$

$V=7.1 \text{ m/s}$

Temperature a +30 m

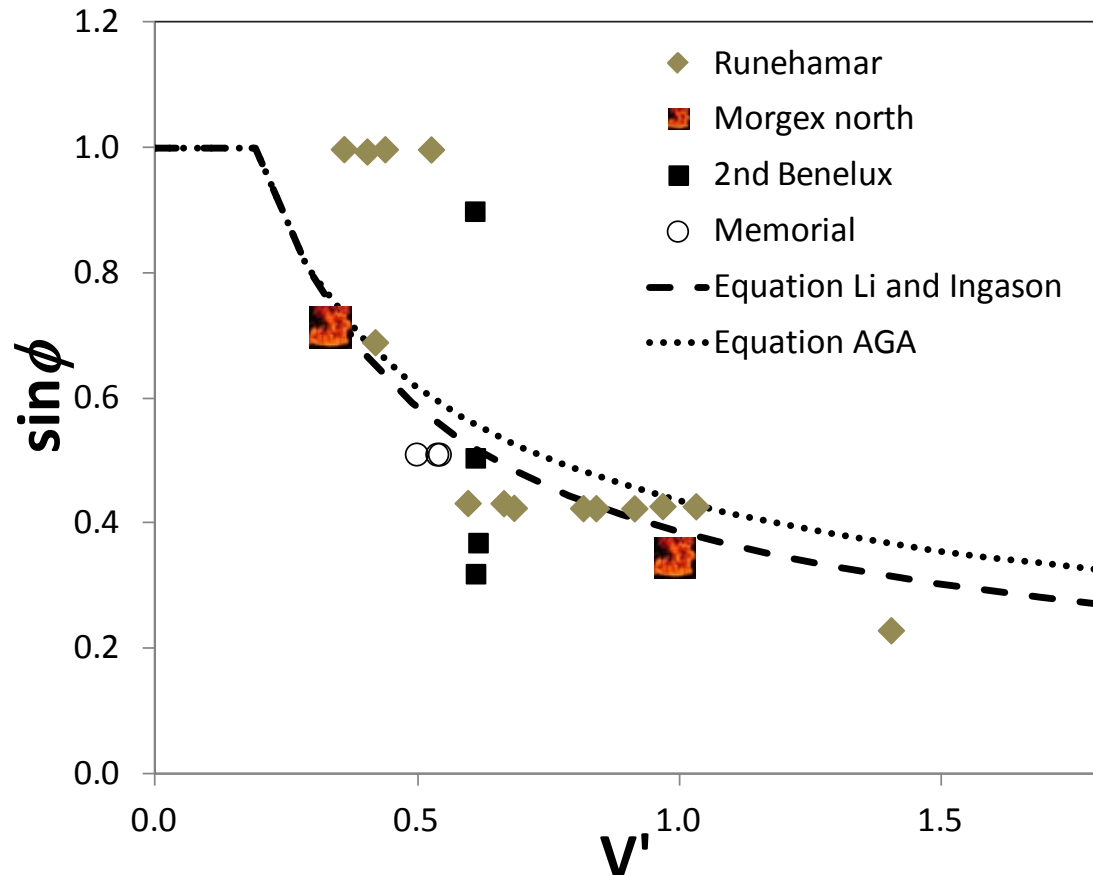




Confronto con dati e correlazioni di letteratura: Angolo di fiamma

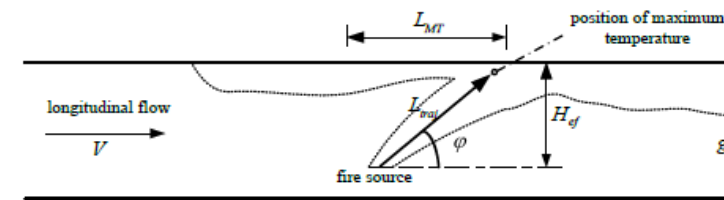
15

$$\sin \theta = \begin{cases} 1 & V' \leq 0.19 \\ (5.26V')^{-\frac{3}{5}} & V' > 0.19 \text{ and } Q^* \leq 0.15 \\ 0.5 \cdot H^{\frac{1}{2}} (b_{f0} \cdot V^3)^{-\frac{1}{5}} & V' > 0.19 \text{ and } Q^* > 0.15 \end{cases}$$



Li, Y. Z., Ingason, H., "Position of Maximum Ceiling Temperature in a Tunnel Fire", *Fire Technology* 48:38-48 (2012).

American Gas Association LNG safety research program, report IS3-1. American Gas Association, Washington, DC (1974).



$$V' = \frac{V}{\sqrt[3]{\frac{g \cdot Q}{b_{f0} \cdot \rho_0 \cdot c_p \cdot T_0}}}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 \cdot c_p \cdot T_0 \cdot g^{1/2} \cdot H^{5/2}}$$

V' vel vent adimensionale
 Q^* HRR adimensionale

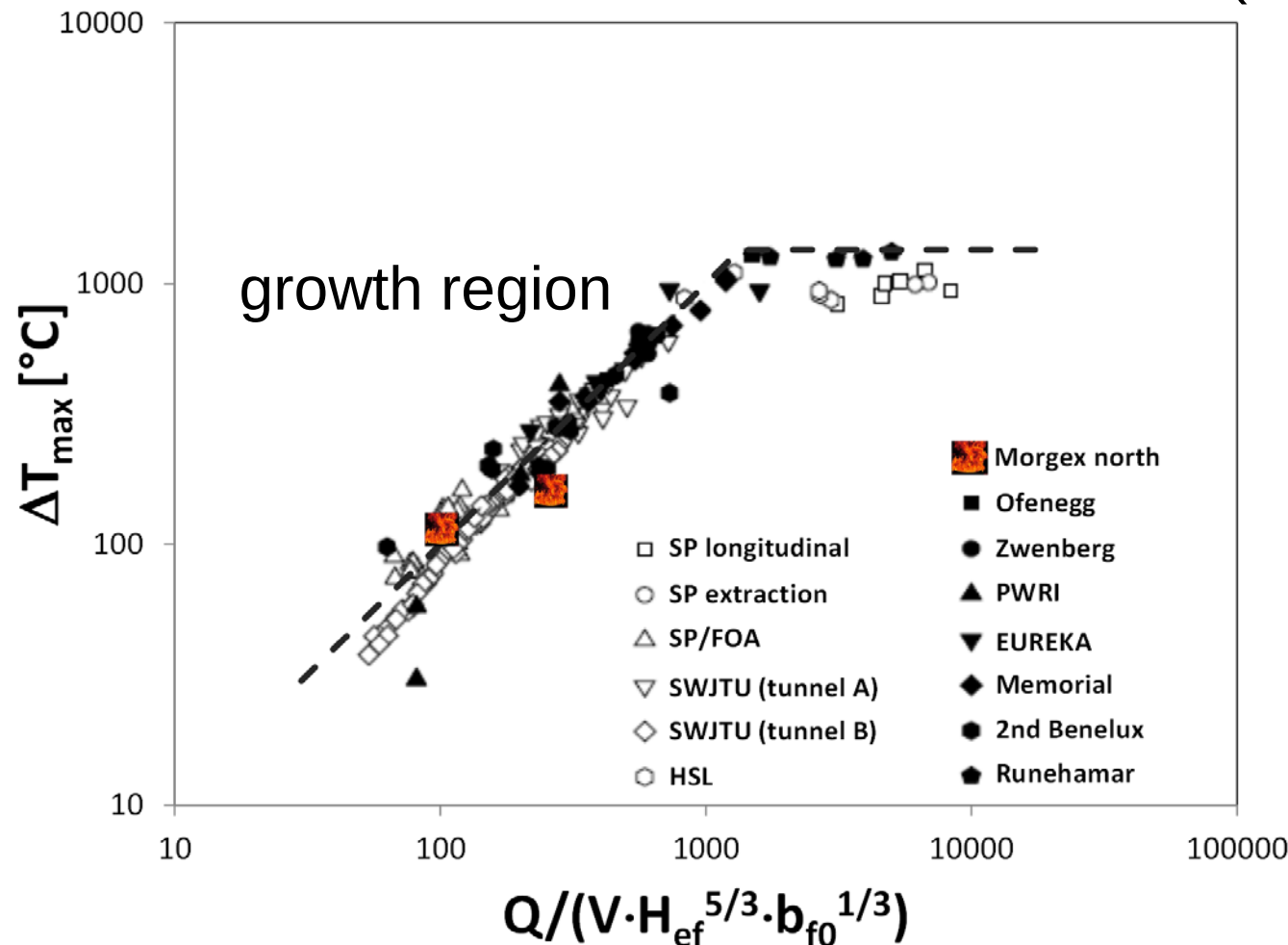


Confronto con dati e correlazioni di letteratura: MAXIMUM (EXCESS) GAS TEMPERATURE

16

$$\Delta T_{\max} = \begin{cases} \frac{Q}{V \cdot H_{ef}^{5/3} \cdot b_{fo}^{1/3}} & \Delta T_{\max} < 1350 [^{\circ}\text{C}] \\ 1350 [^{\circ}\text{C}] & \Delta T_{\max} \geq 1350 [^{\circ}\text{C}] \end{cases}$$

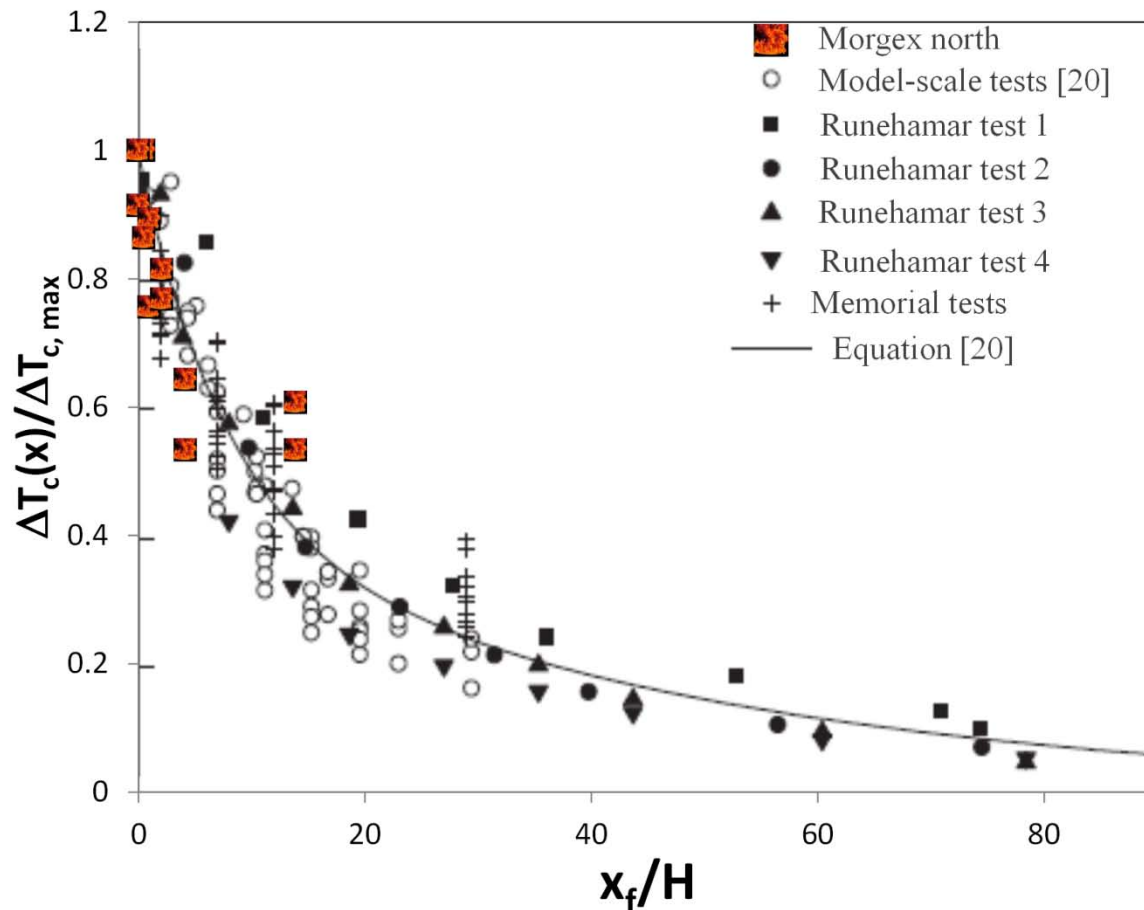
Modello di Li and Ingason per incendio significativamente ventilato ($V' > 0.19$.)



*Li, Y.Z., Ingason, H.,
"Maximum Ceiling
Temperature in a
Tunnel Fire", SP
Report 51 (2010).*



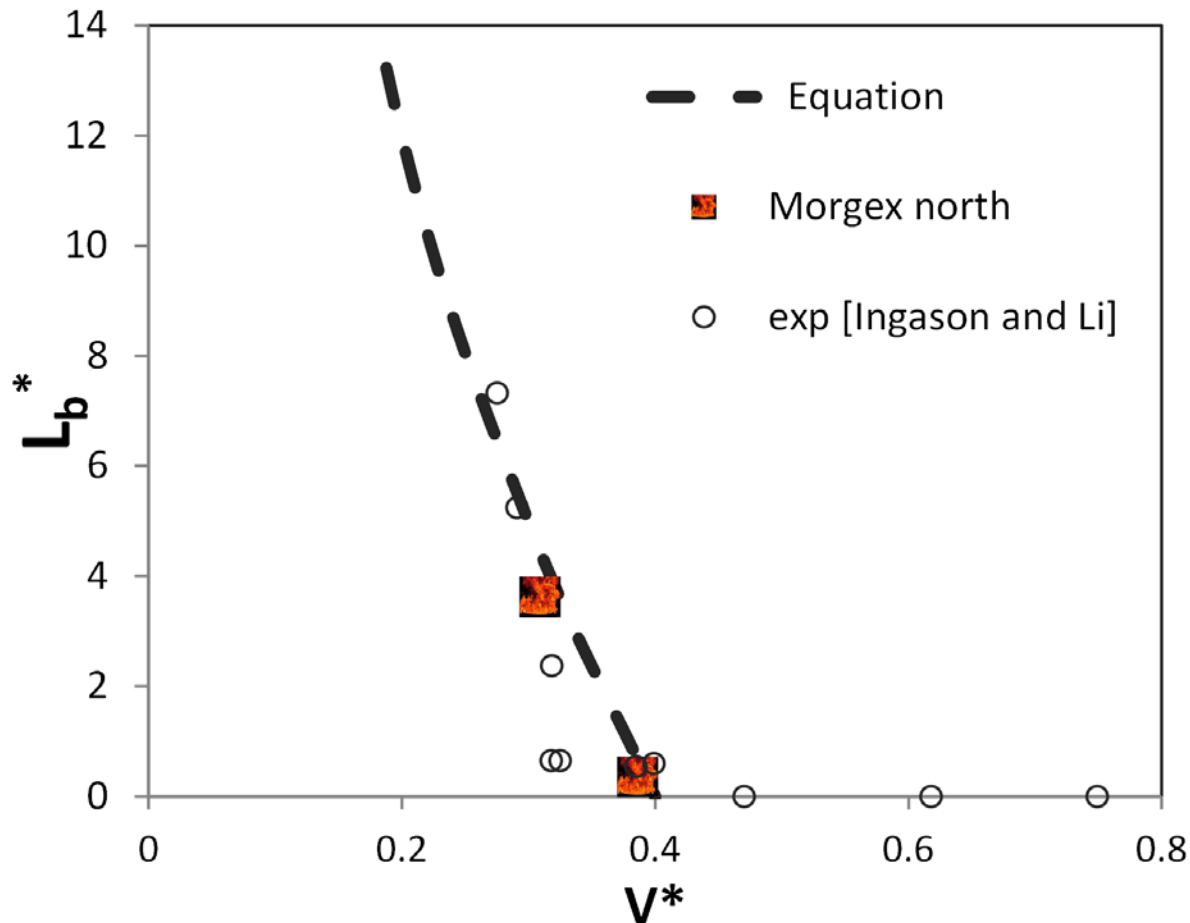
Incremento adimensionale di temperatura in volta in funzione della distanza adimensionale dall'incendio x_f/H



*Li, Y.Z., Ingason, H.,
"Maximum Ceiling
Temperature in a
Tunnel Fire", SP
Report 51 (2010).*



$$L_b^* = \frac{L_b}{H} = 17.3 \cdot \ln(0.4 / V^*); \quad \left(V^* = \frac{V^*}{\sqrt{gH}} \right)$$



Ingason, H., Li, Y.Z.,
“Model scale tunnel fire
tests with longitudinal
ventilation”, *Fire Saf. J.*
45:371–384 (2010).

$V_{crit} = 3.3 \text{ m/s}$



Confronto con dati e correlazioni di letteratura: CRITICAL VENTILATION VELOCITY

19

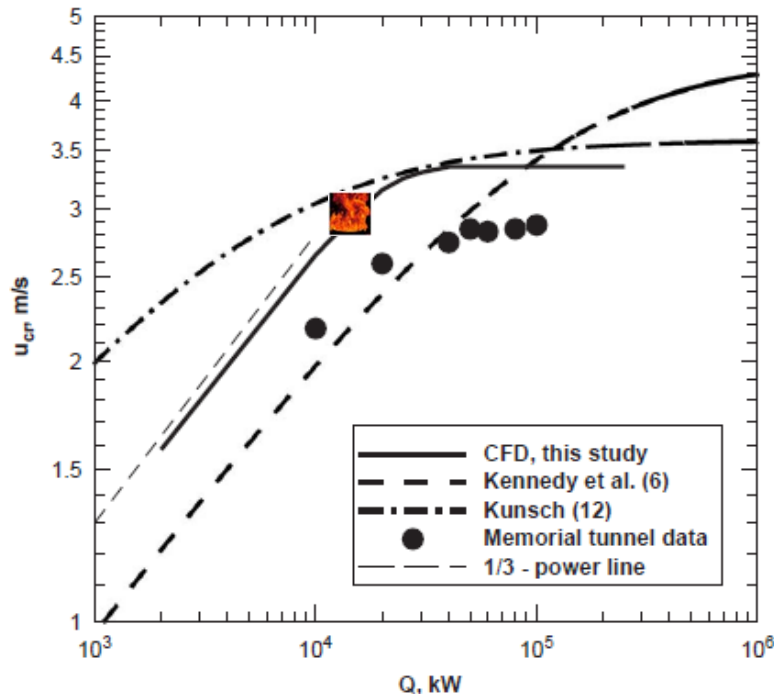
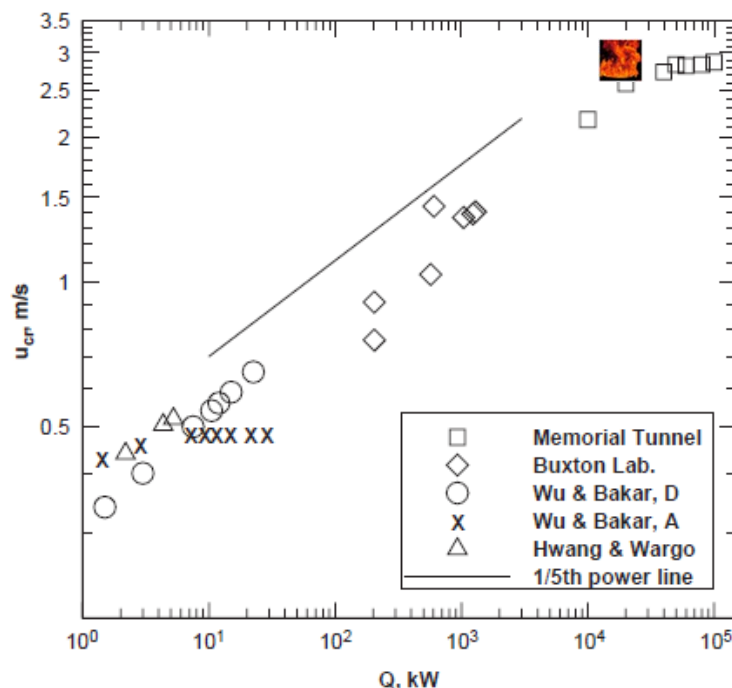
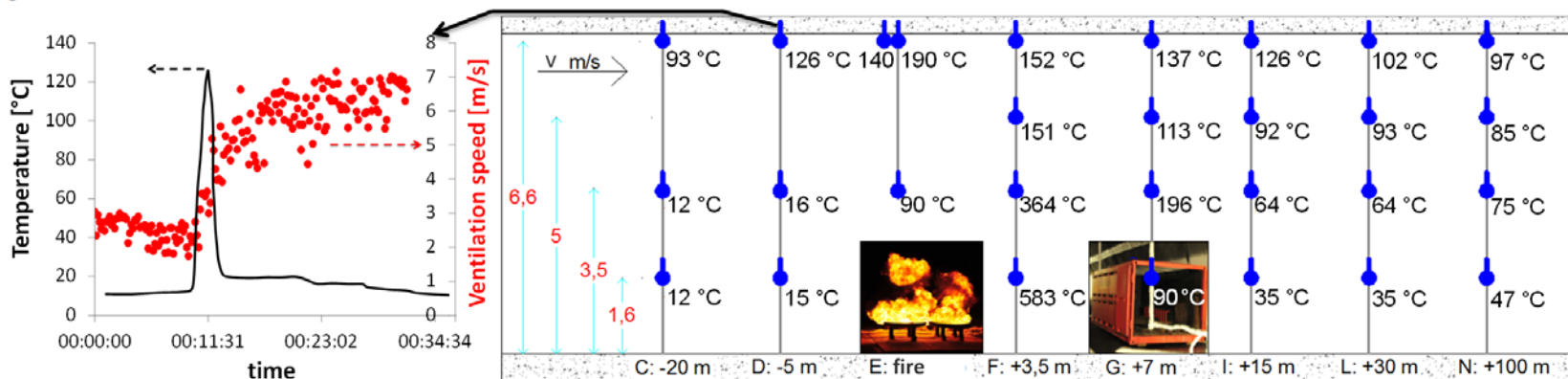


Fig. 2. Experimental data of critical ventilation velocity in tunnel fires. Memorial tunnel: $\bar{H} = 7.72$ m; Buxton lab: $\bar{H} = 2.38$ m; Wu and Bakar, tunnel A: $\bar{H} = 0.176$ m; Wu and Bakar, tunnel D: $\bar{H} = 0.40$ m; Hwang and Wargo: $\bar{H} = 0.343$ m.

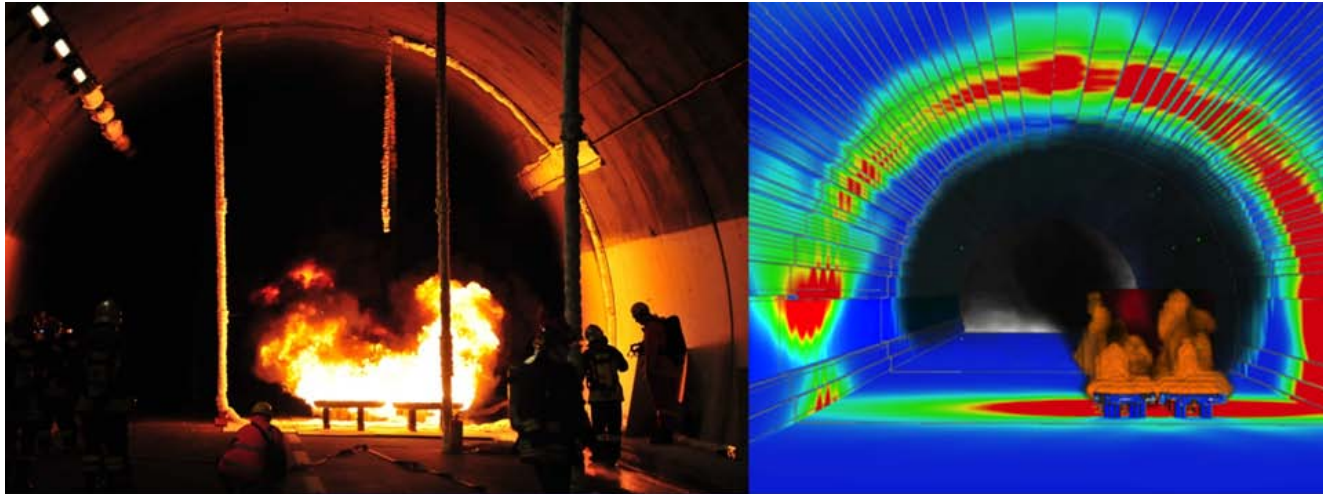
Hwang and Edwards





- Nuovi dati sperimentali in incendio in scala reale (15 MW) presentati e discussi (T, velocità, composizione, soot).
- Le misure sono state confrontate con **modelli empirici** in termini di angolo di fiamma, massimo incremento di temperatura, back-layering in funzione della velocità di ventilazione.
- I risultati sono in accordo con i **modelli** e con **analoghi test in gallerie reali** disponibili in letteratura.
- Morgex è una **condizione di prova severa per modelli CFD** soprattutto per la geometria complessa: zona di bypass a monte dell'incendio, scia del cassone immediatamente a valle dell'incendio stesso, **prova dinamica**.

Ambito di ricerca:



Sicurezza industriale: studio di incendi da pozza

- Simulazione fluidodinamica CFD è preferibile rispetto al solo approccio sperimentale → *software* computazionali
- FDS (*Fire Dynamics Simulator*), sviluppato dal NIST (*National Institute of Standards and Technology*) è l'attuale riferimento per:
 - la simulazione di incendi e lo studio delle caratteristiche della fiamma;
 - l'analisi delle conseguenze in un determinato ambiente



Fire Dynamics Simulator (FDS):

- Equazioni della combustione per bassi numeri di Mach (Rehm e Baum ^[*])
- Turbolenza: LES con modello di Smagorinsky
- **Principali limitazioni:**
 - non è possibile studiare flussi con $Ma > 0.3$
 - **incapacità di predire la formazione di specie come il soot**, senza la prescrizione della corrispondente resa
 - schema cinetico globale molto semplificato (**no microinquinanti e gas tossici**)



OBIETTIVO: Implementazione della cinetica di reazione con meccanismo di qualsivoglia complessità (migliaia di reazioni e centinaia di specie chimiche)

[*] R.G. Rehm and H.R. Baum. *The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows*. Journal of Research of the NBS, 83:297–308, 1978



Confronto con i dati sperimentali:

Cinetica dettagliata (affrontata con l'approccio Flamelet):

- 265 specie
- 14865 reazioni
- Formazione di soot

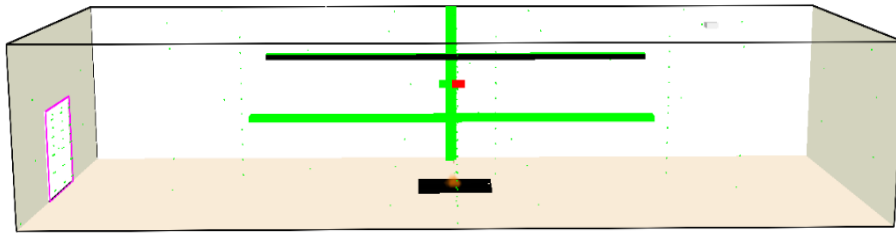
Test case con dati sperimentali studiati:

Nome del caso	Combustibile	Ambiente	Sorgente	Quantità monitorate
McCaffrey	Metano	Pozza di 30 cm in ambiente non confinato	33 kW	Temperature, velocità
Steckler	Metano	Pozza di 30 cm in ambiente confinato	62.9 kW	Temperature, velocità
NIST/NRC	N-eptano	Pozza di 1 m in ambiente confinato	1190.4 kW (crescente)	Temperature, velocità, specie, flussi
Pierce & Moss	N-eptano	Pozza di 20.4 cm in ambiente confinato	62.75 kW	Soot
Schälike et al.	N-esano	Pozza di 50 mm in ambiente non confinato	2.12 kW	Specie, temperature

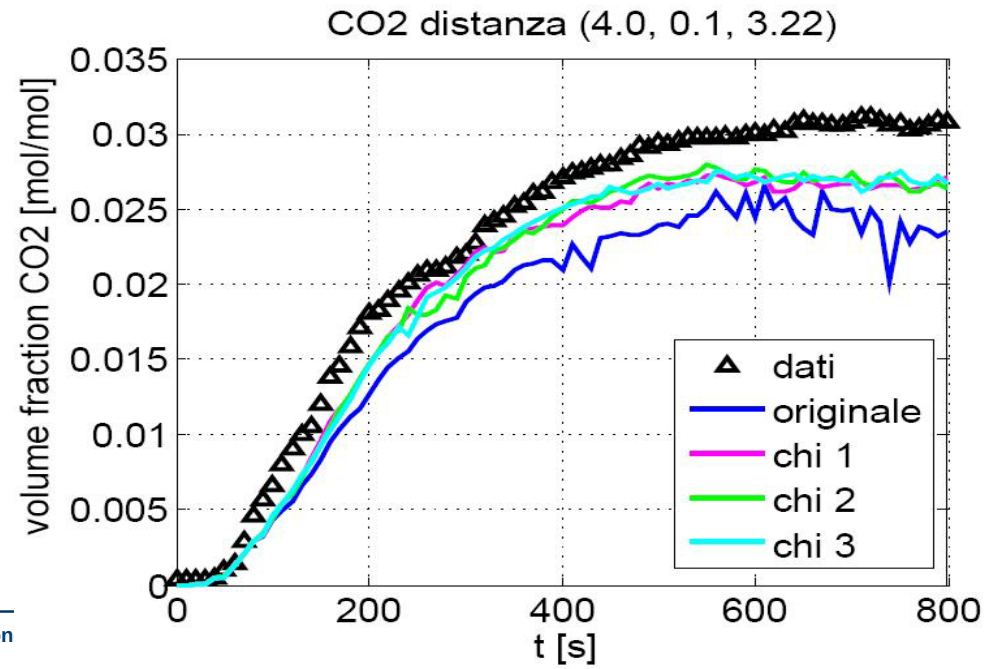
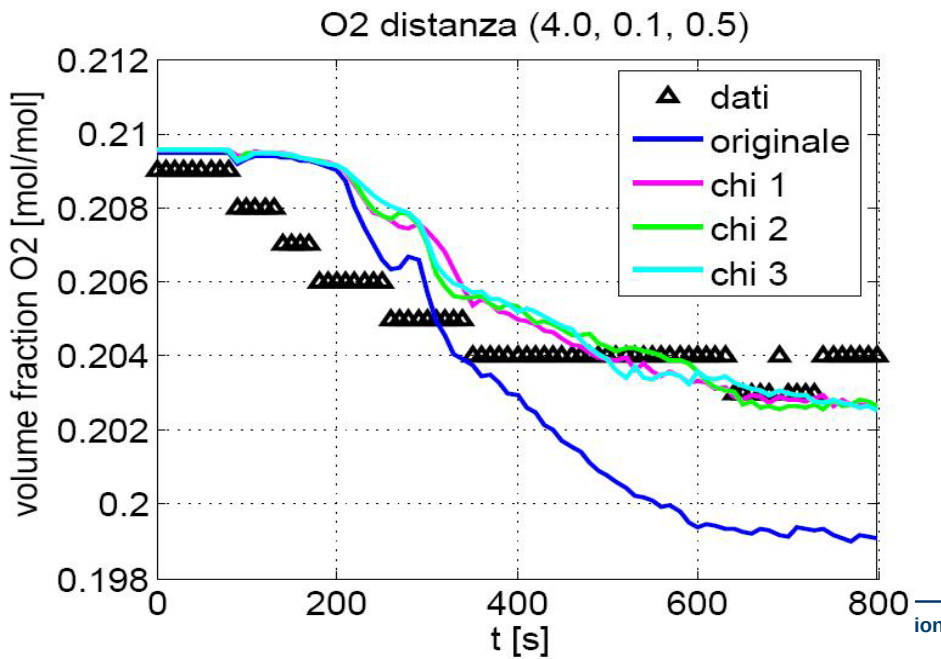
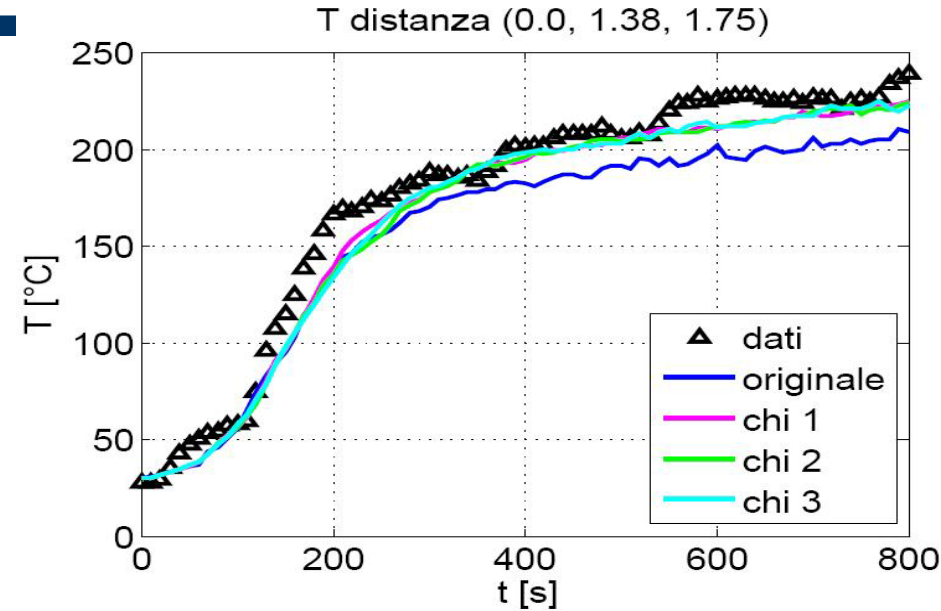


Confronto con dati sperimentali: specie e temperatura in NIST/NRC

24



- Grande ambiente confinato
- Monitorati i valori istantanei
- Combustibile: n-eptano

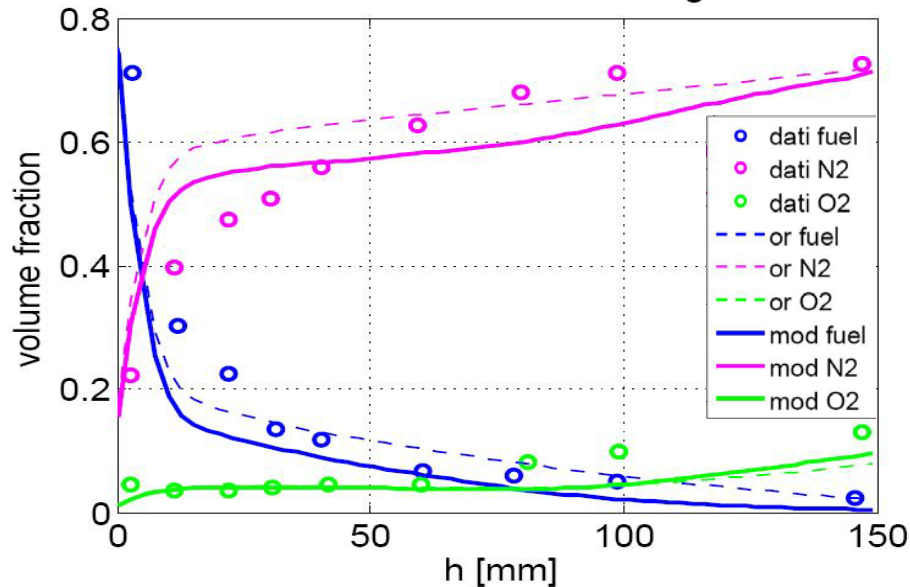




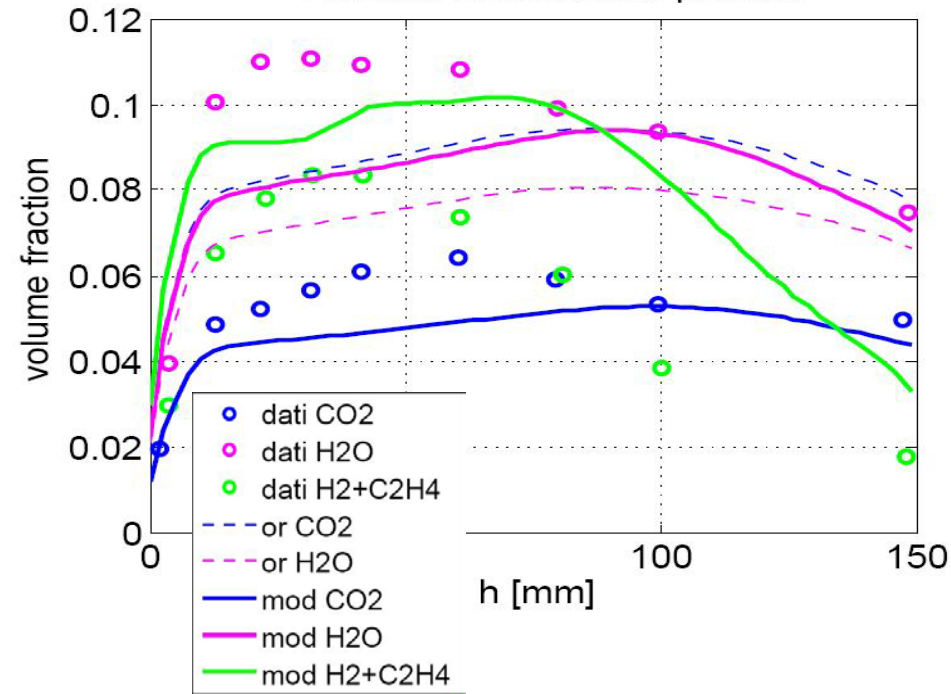
Confronto con dati sperimentali: il caso di Schälike et al.

25

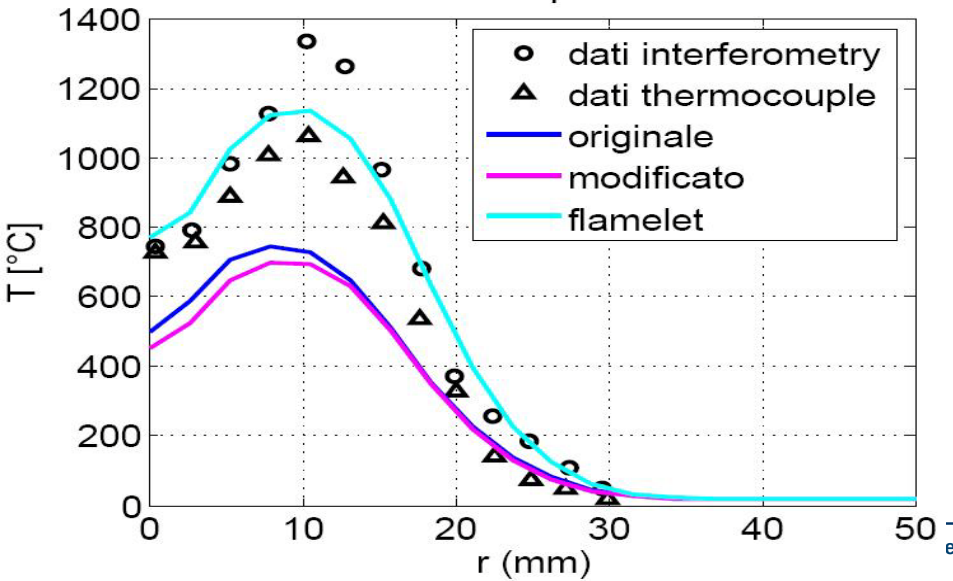
Frazioni volumetriche reagenti



Frazioni volumetriche prodotti



Profilo radiale di temperatura a $h = 50$ mm



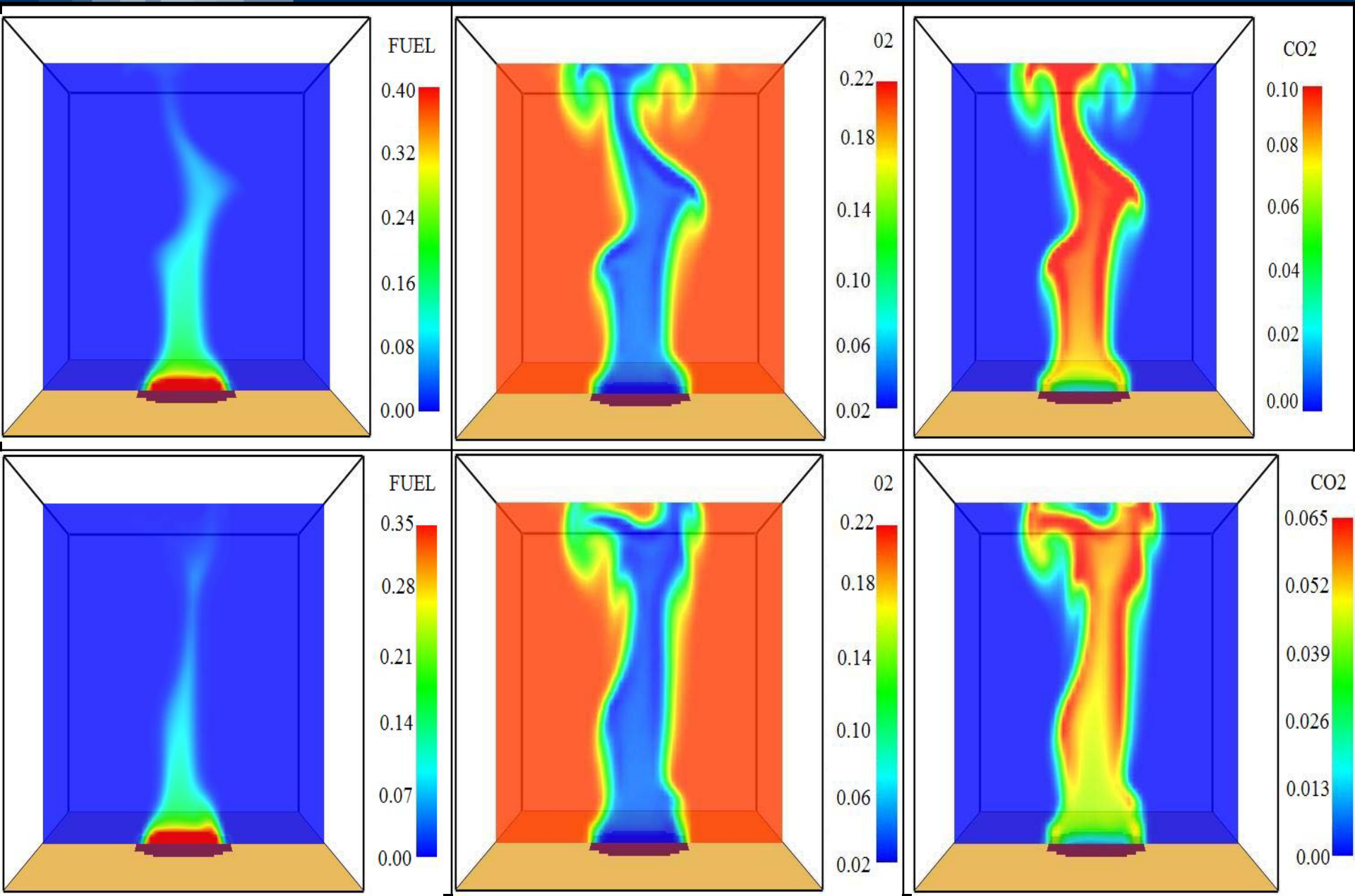
- Pozza circolare con $D = 50$ mm
- Ambiente non confinato
- Combustibile: n-esano

Dati sperimentali da: S. Schälike, K. Wehrstedt, M. Gawlowski, and A. Schönbucher, "Validation of submodels for CFD simulation of *n*-hexane pool flames including interferometry", Chemie Ingenieur Technik 2012, 84, No. 4, 484-490



Il caso di Schälike et al.: *slice file* (sopra = originale, sotto = modificato)

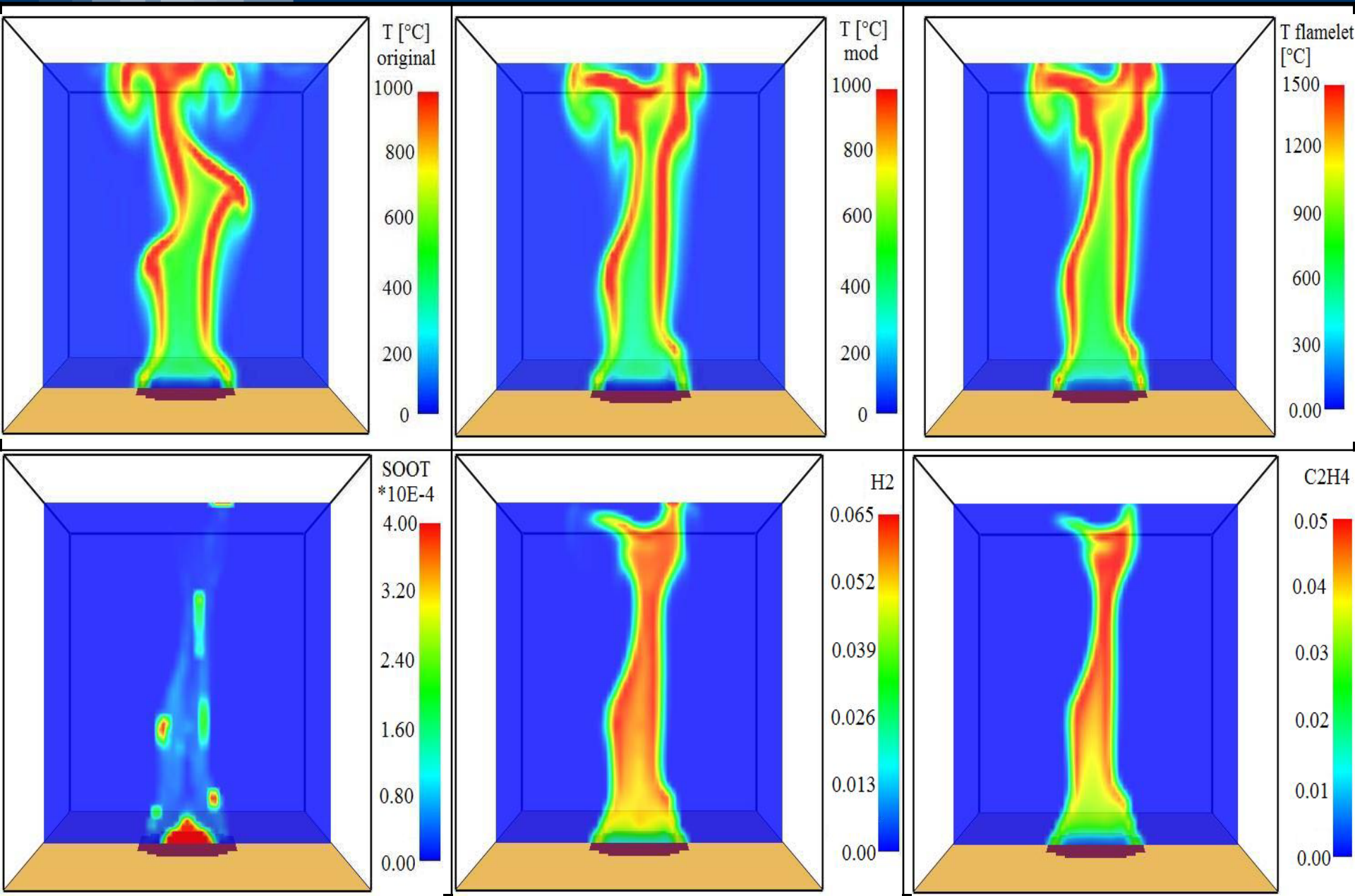
26





Il caso di Schälike et al.: *slice file per T e specie aggiuntive*

27



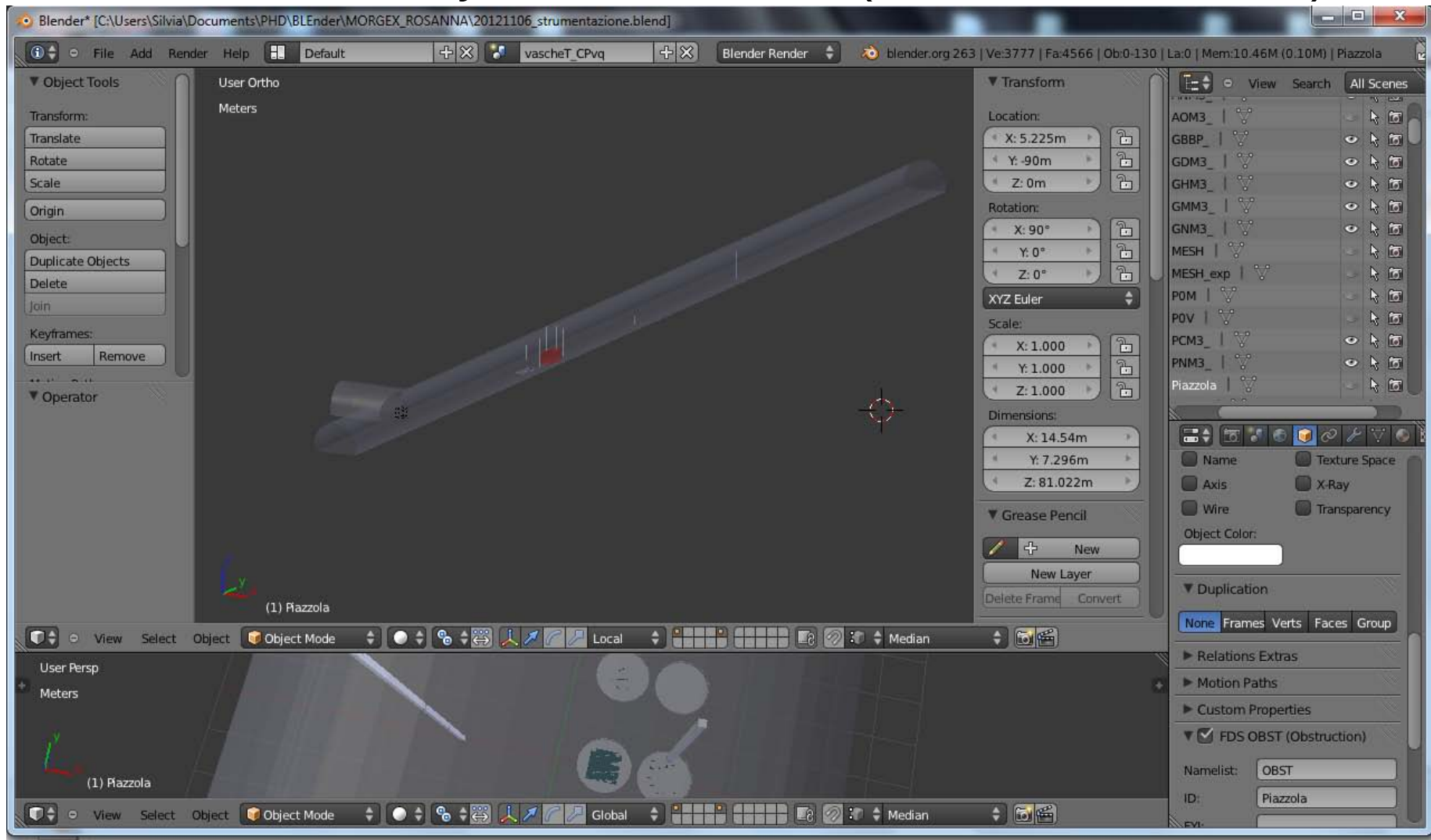


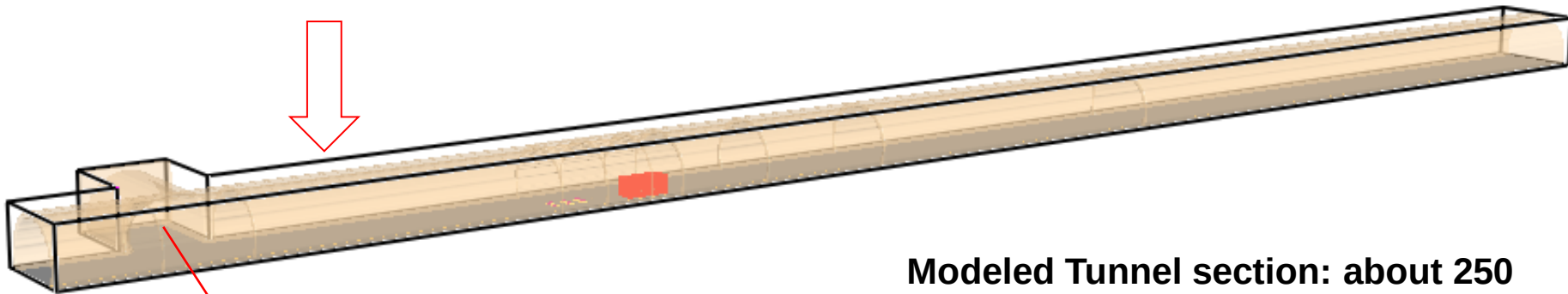
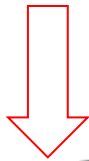
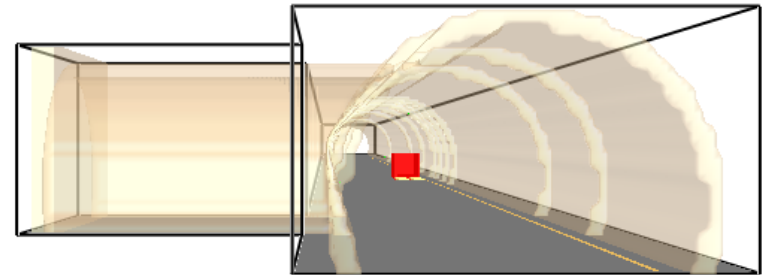
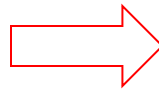
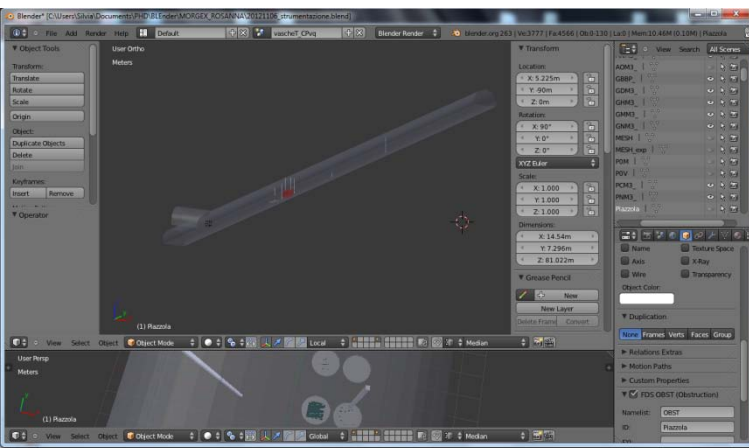
Conclusioni (Tesi Ilaria Marchese AA 2012-2013):

- Approccio Flamelet:
 - **cinetica di qualsivoglia complessità**
 - **stima delle frazioni di tutte le specie in libreria**
- Studio di convalida:
 - confronto con FDS originale
 - ulteriore confronto con dati sperimentali
 - Applicazione a caso Morgex



Blender => Fire Dynamic Simulator (BlenderFDS by E. Gissi)

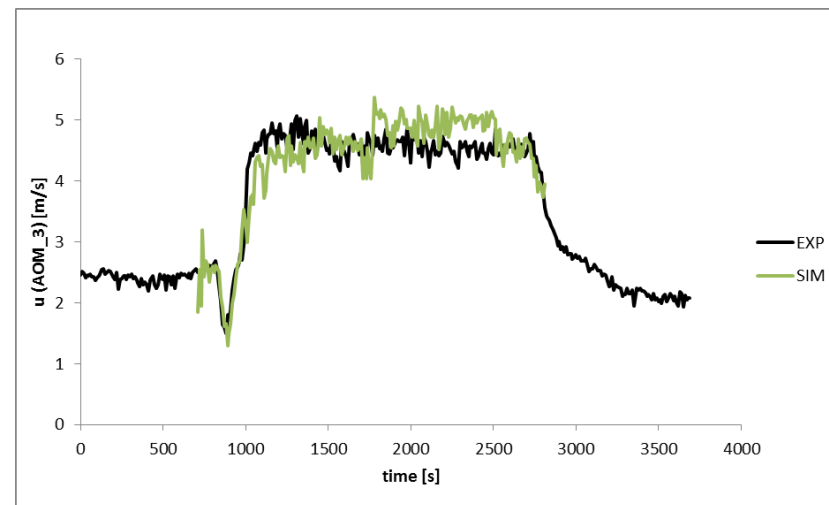
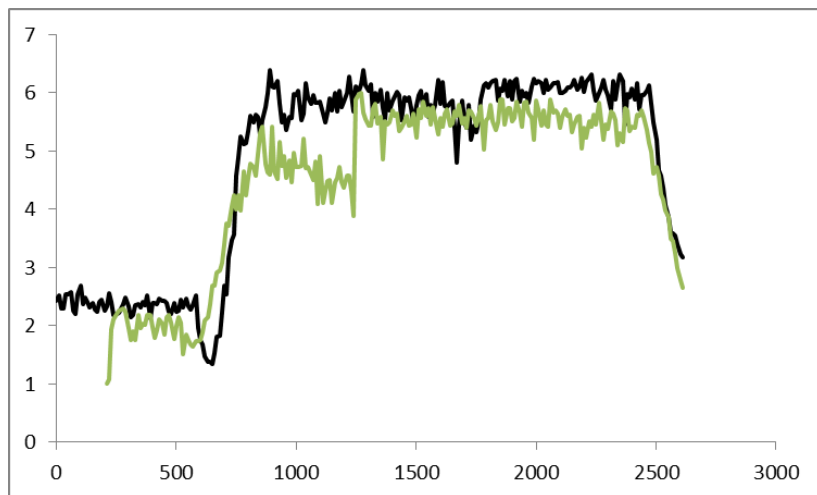
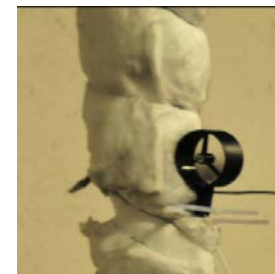
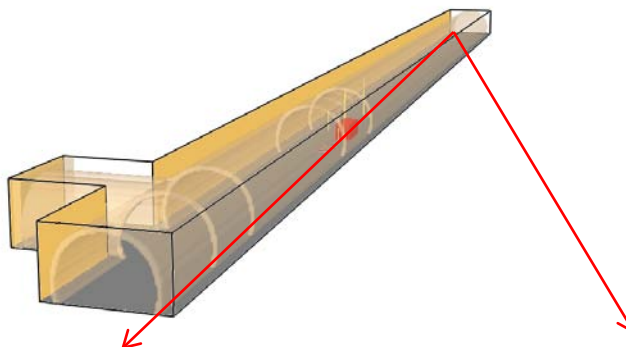




Modeled Tunnel section: about 250 m long x 10.5 m width x 7 m high
Smallest cell size: 10 cm

Computational domain: more than 11 Mcells (multi-core cluster)



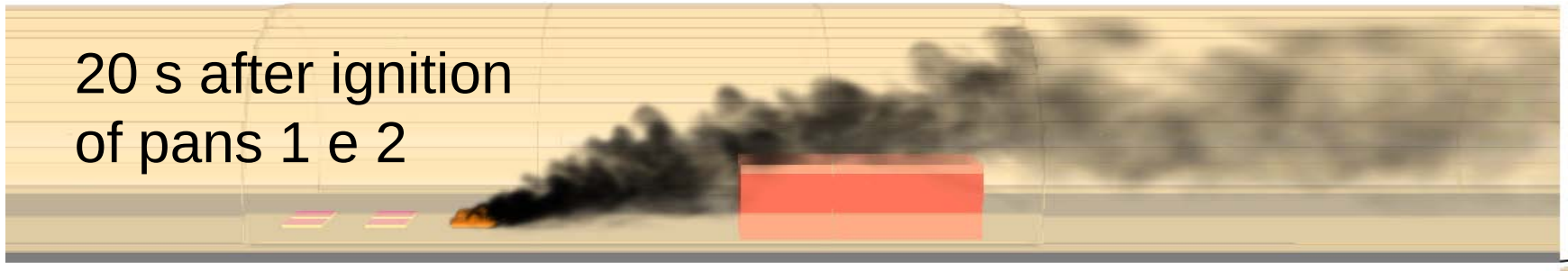


```
&SURF ID='VVENT', VEL=-6, COLOR='BLUE', RAMP_V='ramp_01_su' /
```

```
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 0.0, F=0.383/  
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 350.0, F=0.383/  
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 620.0, F=0.967/  
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 1420.0, F=0.967/  
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 1550.0, F=1/  
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 2230.0, F=1/  
&RAMP ID='ramp_01_su', T= 2370.0, F=0.5/
```

```
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 0.0, F=0.48936/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 120.0, F=0.57447/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 180.0, F=0.31915/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 380.0, F=1/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 800.0, F=1/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 900.0, F=0.95745/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 2000.0, F=0.95745/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 2200.0, F=0.6383/  
&RAMP ID='ramp_02_su', T= 3000.0, F=0.42553/
```

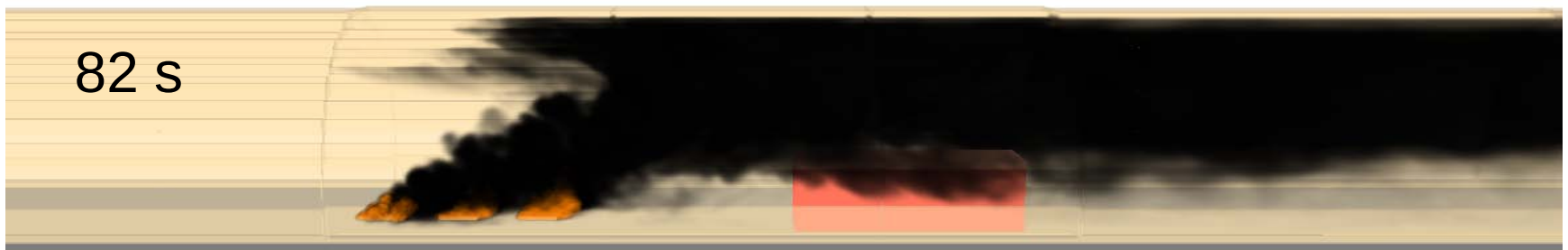

20 s after ignition
of pans 1 e 2



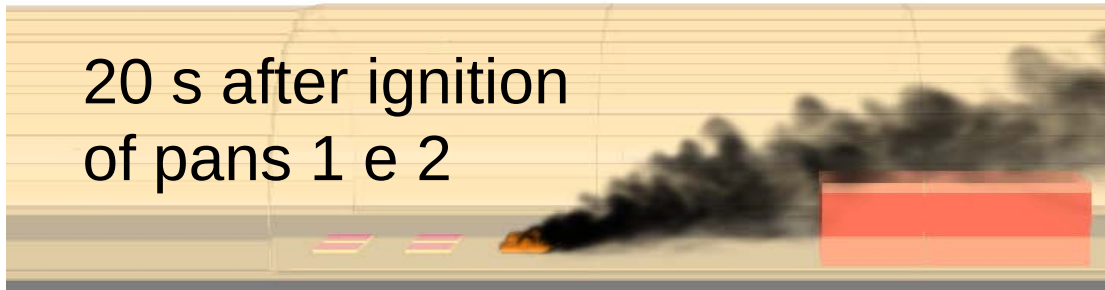
50 s



82 s



20 s after ignition
of pans 1 e 2



50 s



82 s





Simulazione dinamica dello sviluppo dell'incendio e della estinzione differenziata delle pozze

34

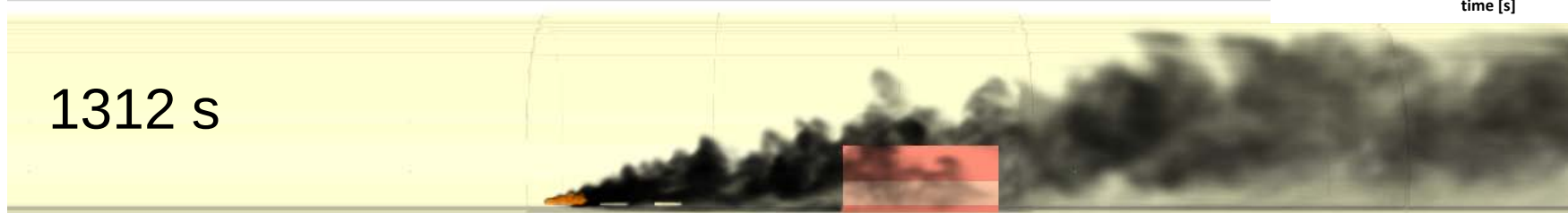
1000 s



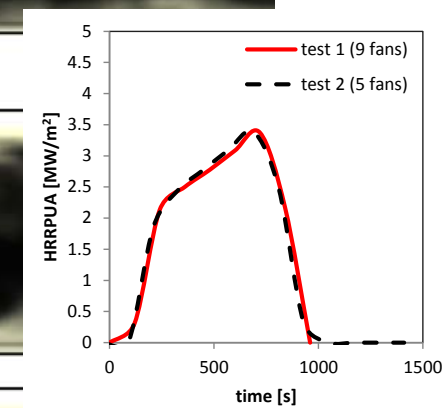
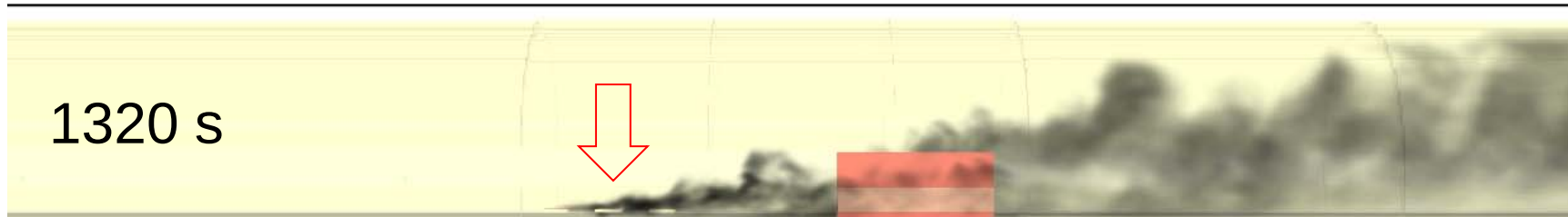
1090 s



1312 s

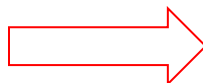


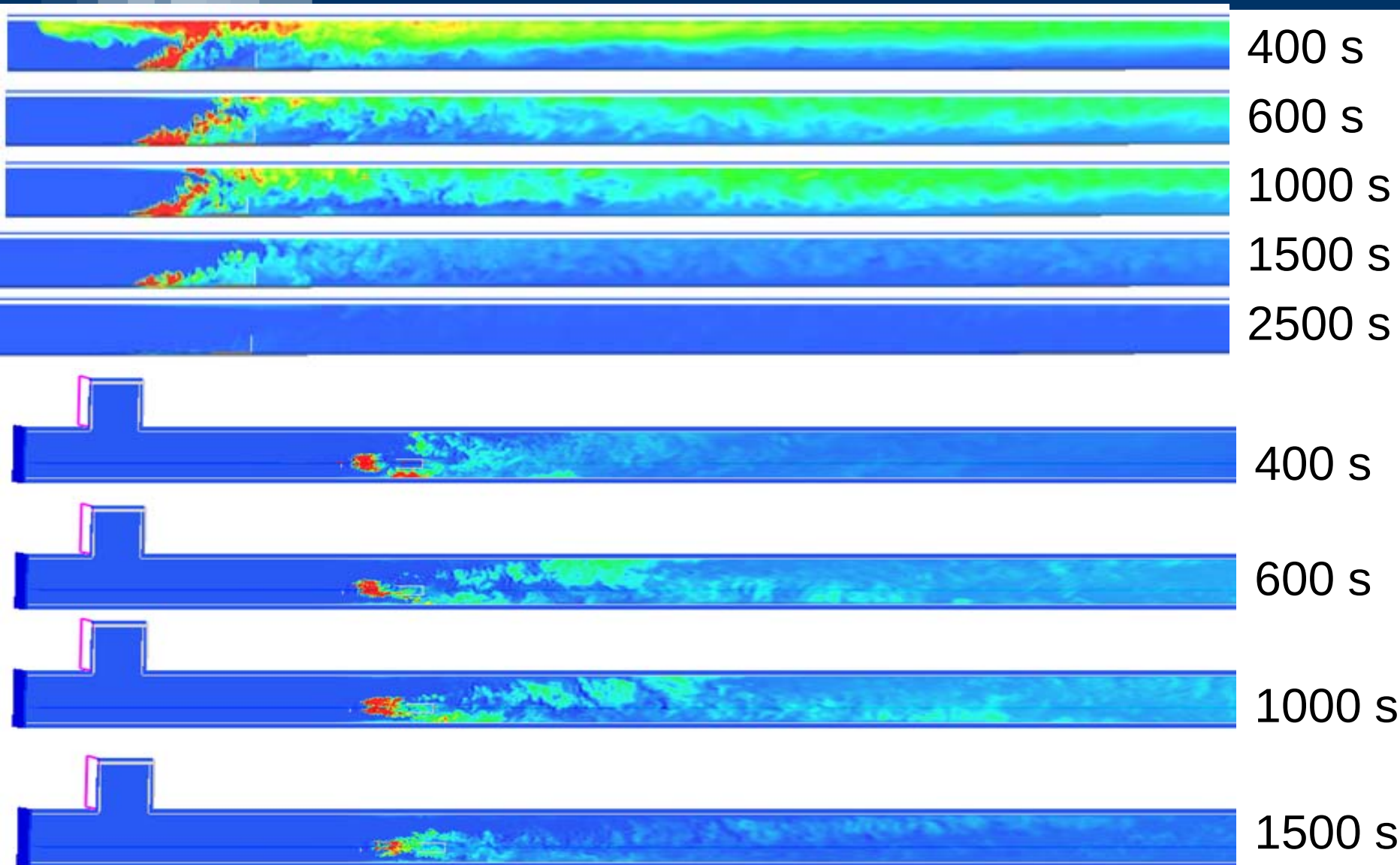
1320 s

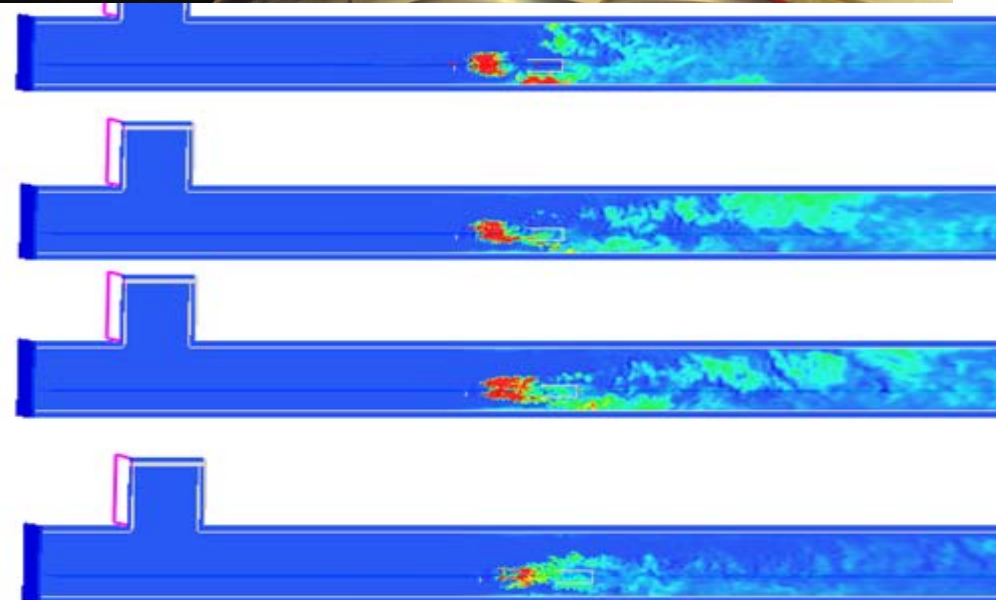
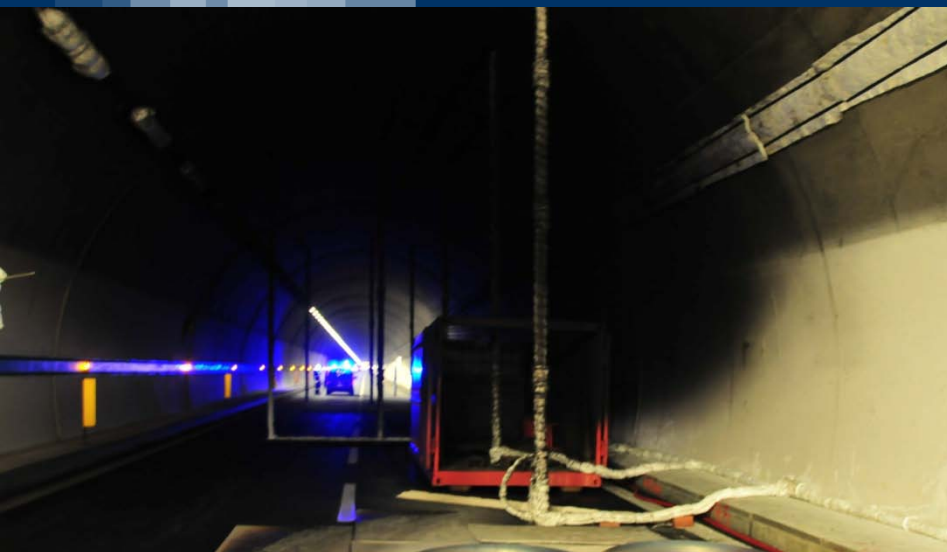




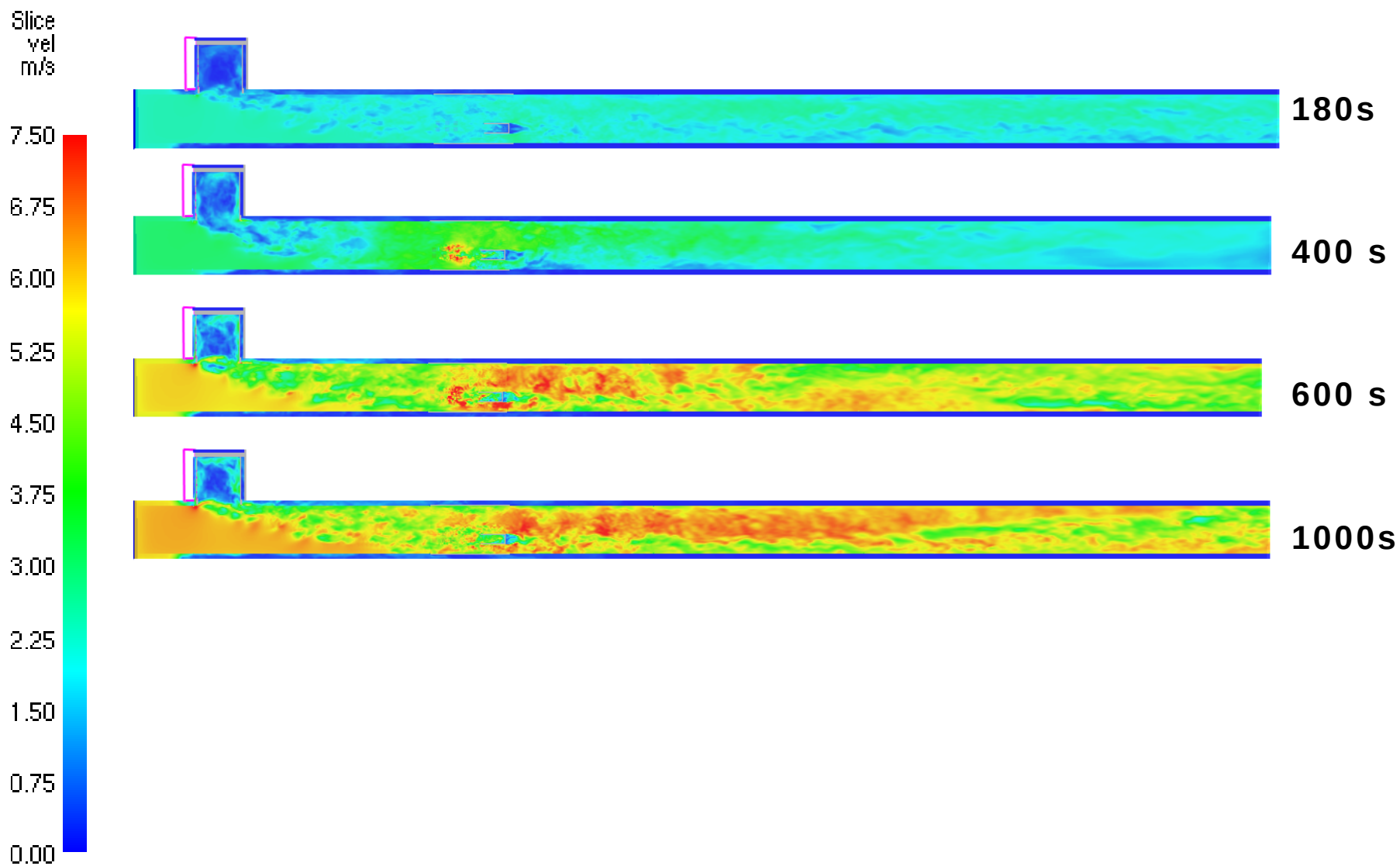
FDS MODELING SMOKE BACKLAYERING vs VENTILATION

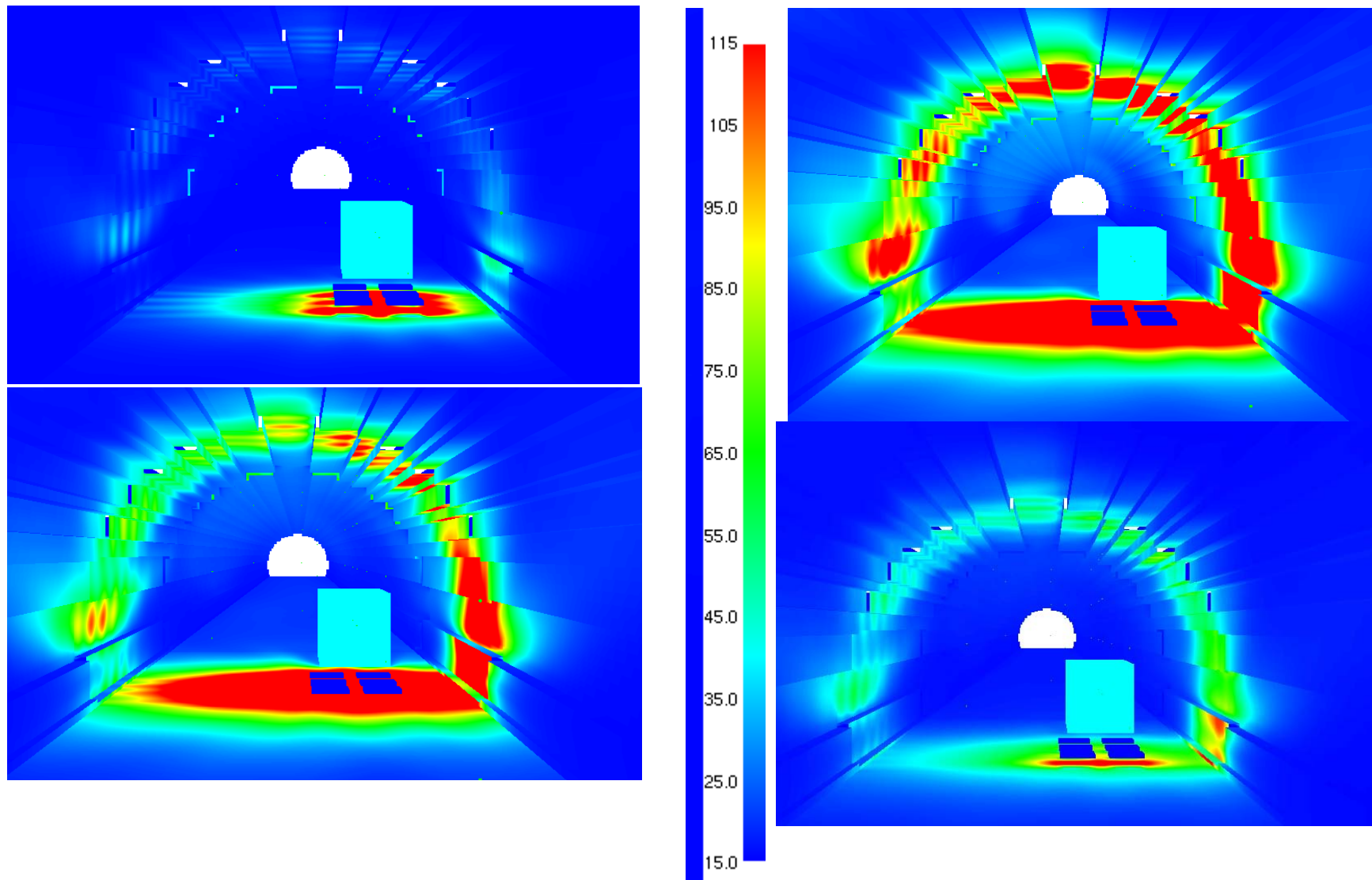


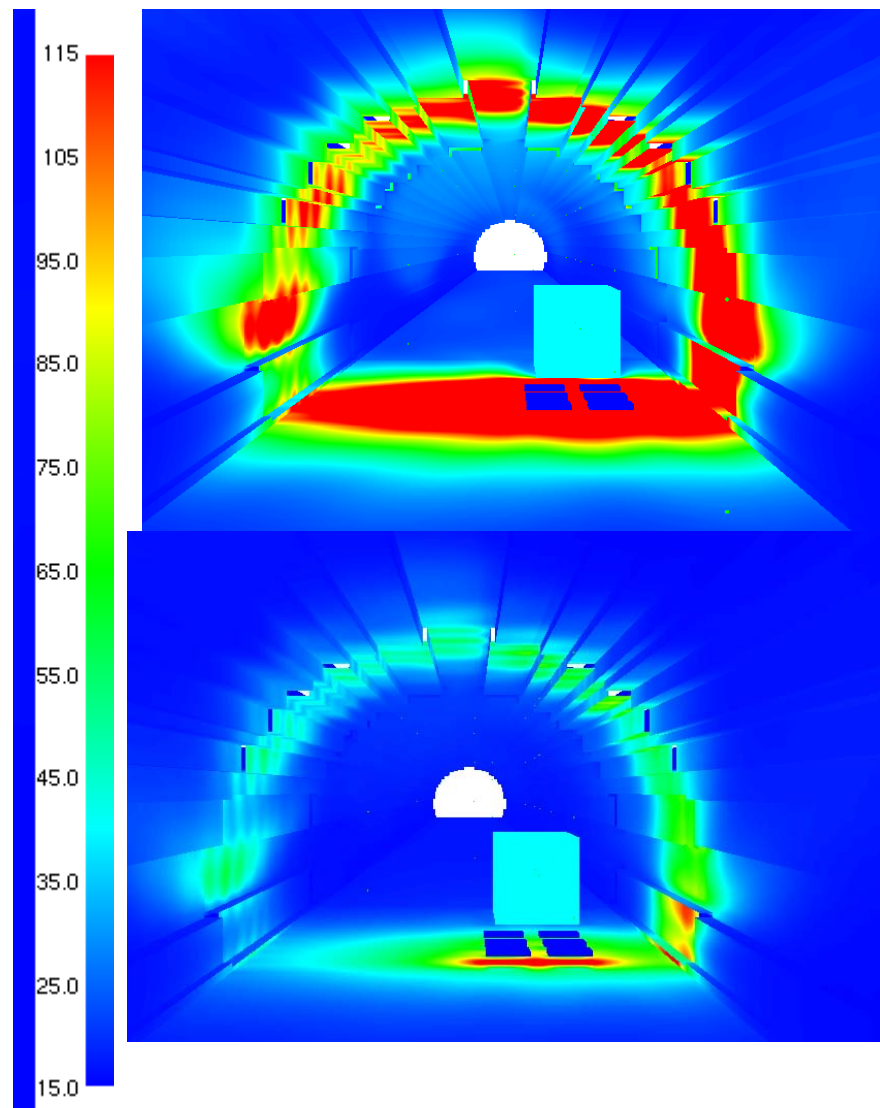


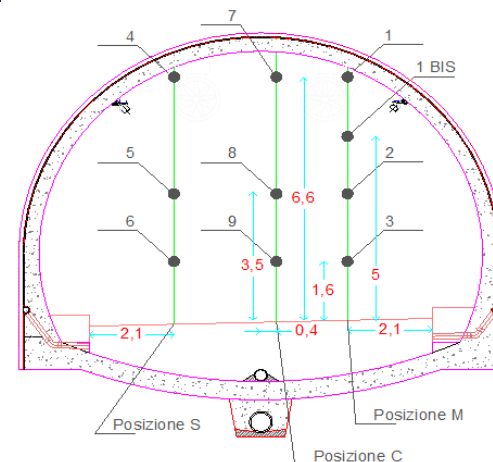
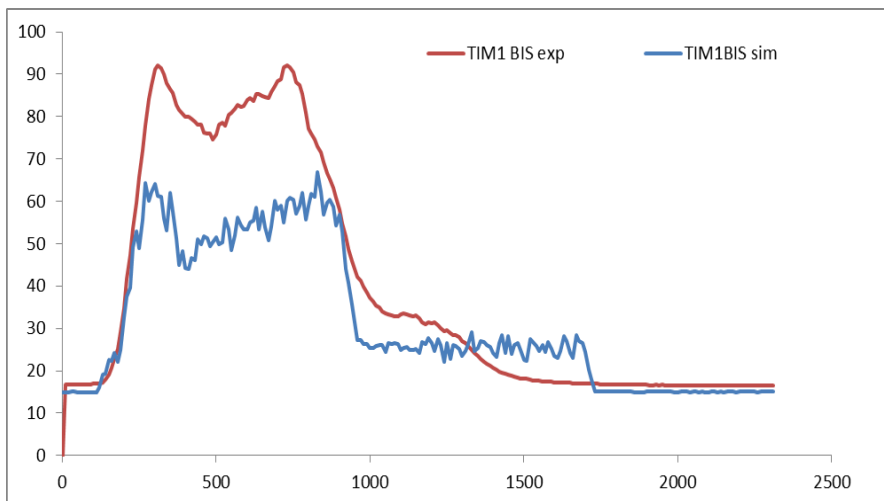


1500 s



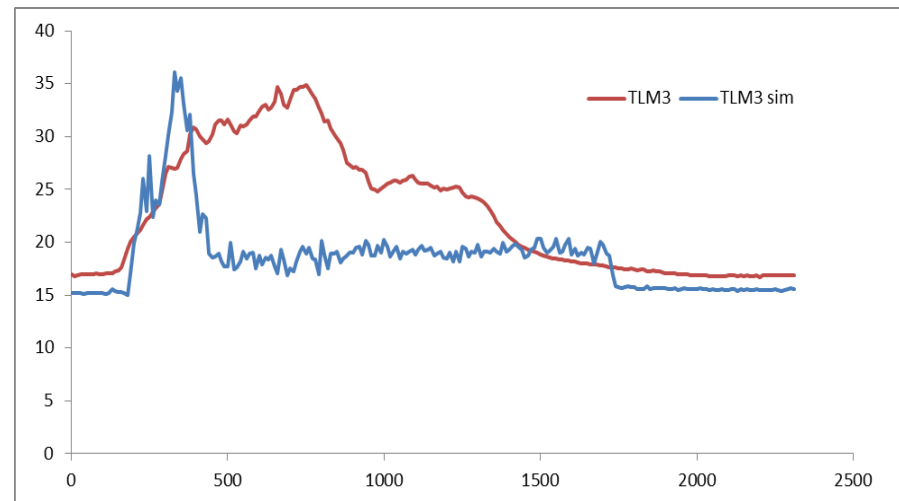
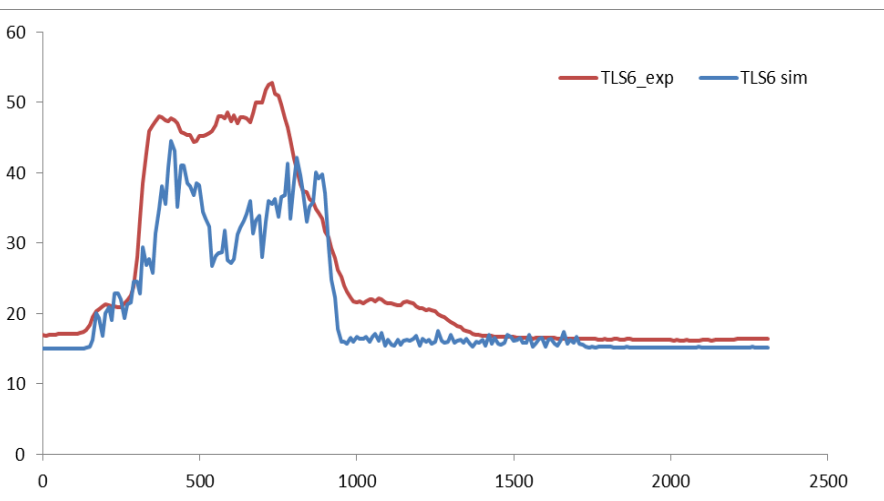






Measurement Locations

E	0 m (fire)
I	+ 15 m
L	+ 30 m





- Completare analisi con **FDS 6 e FireFOAM (coll. Univ. Brussels)**
- Utilizzare dati di composizione di CO, CO₂, PM (soot)
- Utilizzare versione modificata di FDS in grado di utilizzare **schemi cinetici dettagliati**
- Attività già presentata al Med Combustion Symposium, Italian combustion meeting, e inviata a rivista per pubblicazione



Corpo Valdostano
dei Vigili del Fuoco

Direzione
Antincendio e
Soccorso



Raccordo
Autostradale
Valle d'Aosta
S.p.A.,



Ringraziamenti

- Politecnico di Milano support (Progetto 5 per mille).
- Per la collaborazione e professionalità:
- **the POLIMI team (Derudi, Cuoci, Tavelli, tesisti)**
- **Corpo Valdostano dei Vigili del Fuoco**
- **RAV Autostrade SpA**



Corpo Valdostano
dei Vigili del Fuoco

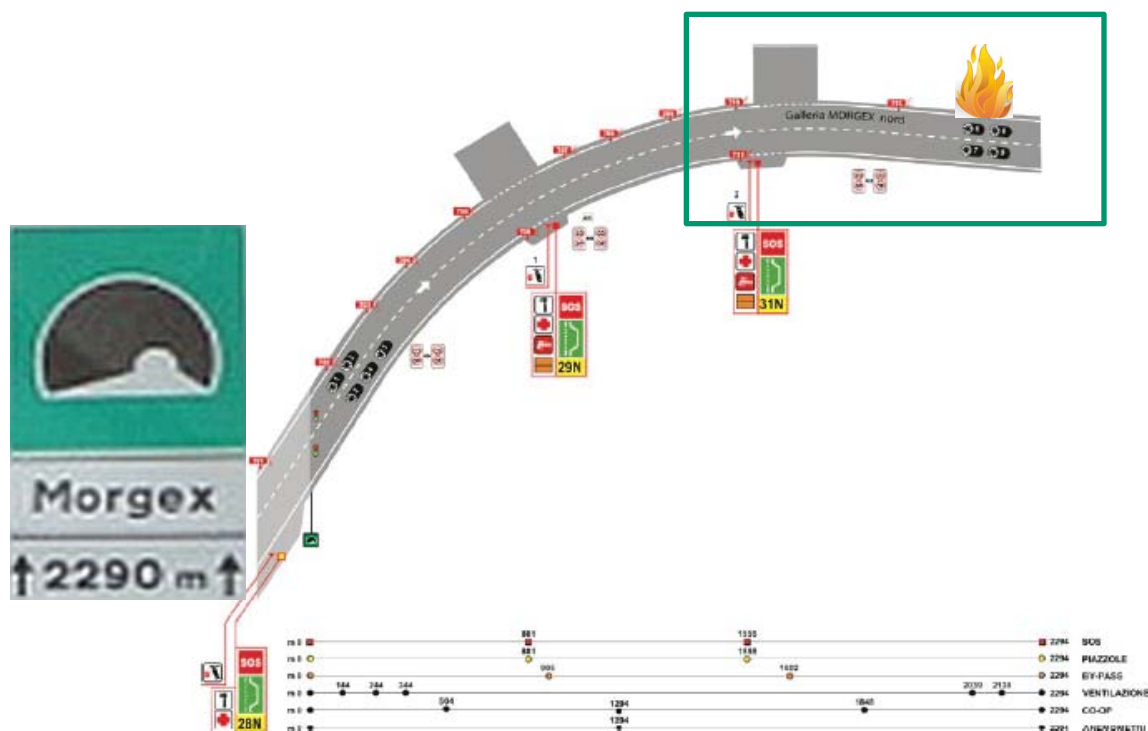
Direzione
Antincendio e
Soccorso



Raccordo
Autostradale
Valle d'Aosta
S.p.A,



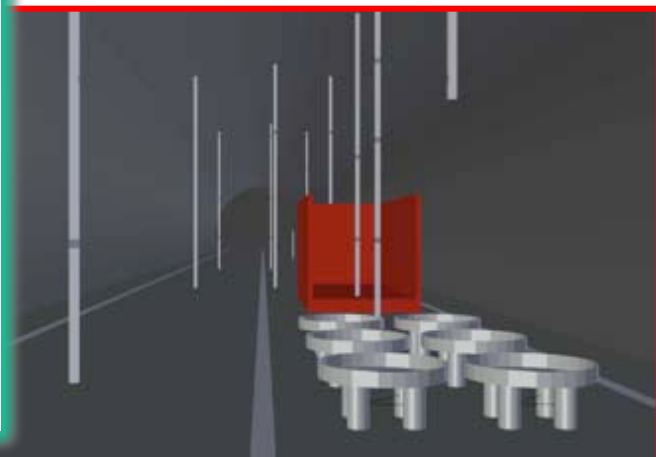
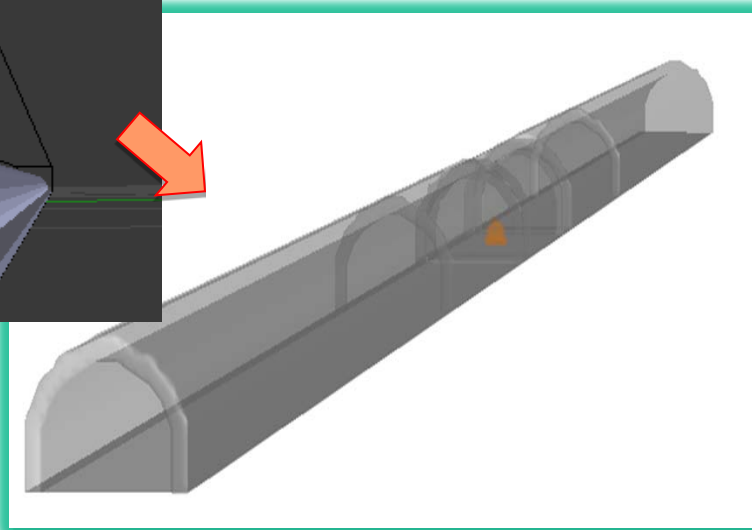
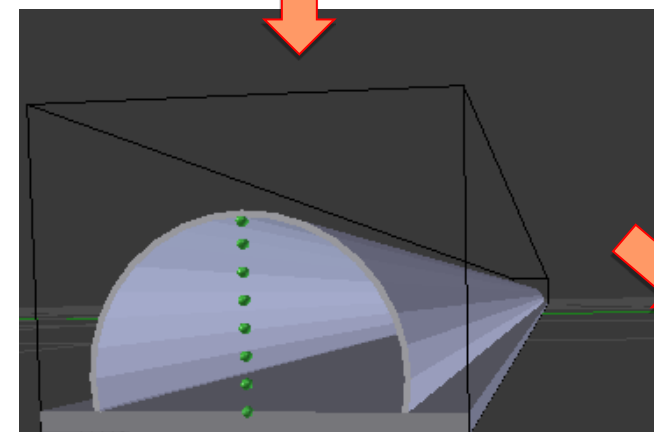
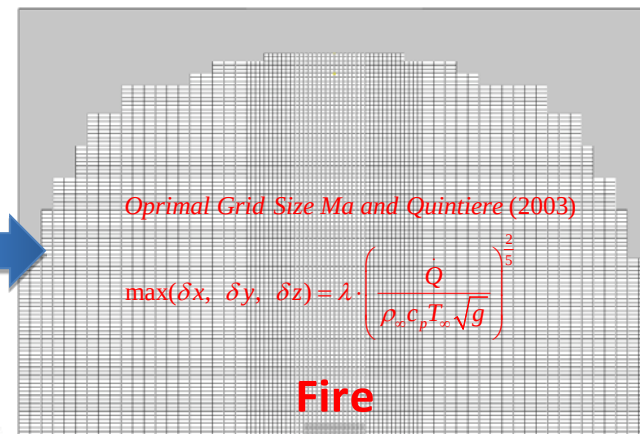
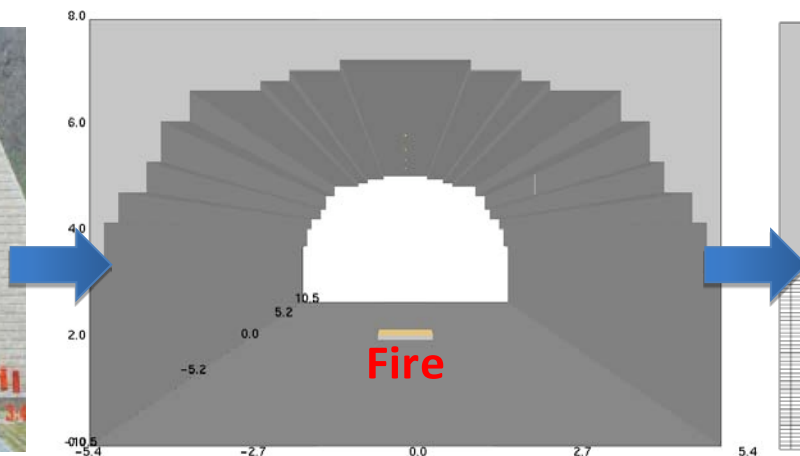
- Test in scala reale (Morgex Tunnel – Autostrada A5)
Incendio localizzato nella parte terminale della galleria



1



Tunnel di 2294 m di lunghezza, 10.50 m di larghezza e altezza massima di 7.2 m. Pendenza media pari a 3.2%.





TUNNEL FIRE SCENARIO #3 PRELIMINARY RESULTS

46

