

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CHIMICA E DEI PROCESSI  
INDUSTRIALI

**Tesi di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Chimica e dei Processi Industriali**

**STUDIO DI INCENDI IN GALLERIA STRADALE:  
SVILUPPO CON CODICE CFD E CONFRONTO  
CON DATI SPERIMENTALI**

*Relatore: Prof. Giuseppe Maschio*

*Correlatore: Chiara Vianello*

*Laureando: RICCARDO MAGROFUOCO*

ANNO ACCADEMICO 2013 – 2014



# Riassunto

Questa tesi costituisce un resoconto dell'attività di tirocinio svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, durante il quale è stato eseguito uno studio sugli incendi in galleria.

Il lavoro comprende uno studio iniziale dei fenomeni che partecipano a un incendio di pozza in ambiente confinato con un successivo sviluppo di un modello fluidodinamico per determinare i profili termici e massivi dei principali gas di combustione che si generano successivamente.

Lo scopo finale di questo lavoro è il confronto dei risultati ottenuti dalla simulazione con i dati sperimentali raccolti nelle prove eseguite all'Università di Genova.

Si ringrazia per la collaborazione il Prof. Giuseppe Maschio e l'Ing. Chiara Vianello.



# Sommario

<b>Riassunto .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduzione .....</b>	<b>9</b>
<b>Capitolo 1 .....</b>	<b>11</b>
<b>Sicurezza nelle gallerie stradali .....</b>	<b>11</b>
1.1 Le gallerie stradali .....	11
1.1.2 <i>Classificazione delle gallerie</i> .....	11
1.2 Il rischio in galleria .....	13
1.2.1 <i>Teoria del rischio</i> .....	13
1.2.2 <i>Possibili scenari</i> .....	13
1.3 Incendi in galleria .....	15
1.3.1 <i>Limiti e rischi del CO</i> .....	15
1.4 Requisiti minimi delle nuove gallerie .....	17
1.4.1 <i>Decreto 05/10/2006</i> .....	17
1.4.2 <i>Requisiti minimi nelle gallerie</i> .....	18
<b>CAPITOLO 2 .....</b>	<b>21</b>
<b>Il modello fisico .....</b>	<b>21</b>
2.1 Fenomeni in studio .....	21
2.2 Analisi preliminari .....	22
2.2.1 <i>Temperatura della pozza</i> .....	22
2.2.2 <i>Valutazione della variazione della portata di vapore</i> .....	24
2.4 Coefficienti di diffusione .....	29
2.5 Costruzione geometria del tunnel in scala .....	30
<b>CAPITOLO 3 .....</b>	<b>33</b>
<b>Il modello matematico .....</b>	<b>33</b>
3.1 Metodo dei volumi finiti .....	33
3.2 Definizione del dominio .....	34
3.2.1 <i>Bilanci di quantità di moto</i> .....	34
3.2.2 <i>Bilanci di massa</i> .....	35
3.2.3 <i>Bilanci di Energia</i> .....	36
3.3 Determinazioni delle condizioni al contorno .....	37
3.3.1 <i>Bilanci di quantità d moto</i> .....	37

3.3.2 Bilanci di massa .....	38
3.3.2 Bilanci di energia.....	39
3.4 Costruzione della Mesh .....	40
<b>CAPITOLO 4 .....</b>	<b>41</b>
<b>Dati sperimentali.....</b>	<b>39</b>
4.1 Prove Sperimentali.....	41
4.2 Profili termici .....	43
4.3 Profili di concentrazione .....	44
4.3.1 Profili del monossido di carbonio.....	45
4.3.2 Profili dell'ossigeno .....	46
4.4 Incendio con un combustibile più complesso .....	48
<b>CAPITOLO 5 .....</b>	<b>51</b>
<b>Risultati ottenuti.....</b>	<b>51</b>
5.1. Schema cinetico numero 1 .....	52
5.1. Simulazione con velocità del vento pari a 0,01 m/s.....	52
5.1.2 Simulazione con velocità del vento pari a 0,1 m/s.....	58
5.1.3 Simulazione con velocità del vento pari a 0,5 m/s.....	64
5.1.4 Osservazioni.....	69
5.2 Schema cinetico numero 2 .....	69
5.2.1 Risultati ottenuti con la cinetica "PARAMETRI 1".....	70
5.2.1.1 Velocità 0.01 m/s .....	71
5.2.1.2 Velocità 0.1 m/s .....	72
5.2.1.3 Velocità 0.5 m/s .....	74
5.2.2 Risultati ottenuti con la cinetica "PARAMETRI 2".....	75
5.2.2.1 Velocità 0,01 m/s .....	75
5.2.2.2 Velocità 0.1 m/s .....	77
5.2.2.3 Velocità 0.5 m/s .....	78
<b>Conclusioni .....</b>	<b>81</b>
<b>Nomenclatura .....</b>	<b>85</b>
<b>Allegati.....</b>	<b>87</b>
Allegato 1 .....	87
<b>Riferimenti Bibliografici .....</b>	<b>91</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>93</b>







# Introduzione

Il lavoro di questa tesi riguarda lo studio degli incendi nelle gallerie stradali e degli scenari che si possono creare in funzione delle caratteristiche ambientali presenti.

È stato sviluppato un modello per una simulazione considerando una geometria di una galleria in scala 1:30 così da ricreare la stessa geometria utilizzata nelle prove sperimentali eseguite all'Università di Genova.

L'obiettivo finale di questo studio è cercare di creare un modello che possa predire in modo accurato e preciso le conseguenze di un incendio di pozza all'interno di un ambiente confinato come le gallerie stradali.

Un modello fluidodinamico che riporti dei valori simili a quelli che in alternativa sarebbero raccolti sperimentalmente potrebbe evitare i lunghi tempi, i rischi e le spese sostenute per l'organizzazione di prove fatte in campo e permettere di capire come una variazione del quantitativo di combustibile, delle condizioni geometriche e/o ambientali possano influire sui scenari seguenti all'incidente.

Questo studio si divide in tre parti:

- Studio dei principali fenomeni legati agli incendi di pozza;
- Sviluppo di un modello fluidodinamico;
- Confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni con i dati raccolti nelle prove sperimentali.

Nel primo capitolo verranno esposti le principali cause ed i rispettivi rischi associati agli incendi in galleria, i fenomeni ambientali che influenzano questi scenari e tutti i sistemi di sicurezza utilizzati al giorno d'oggi per ridurre al minimo la frequenza di questi scenari.

Nel secondo capitolo sono state sviluppate le equazioni che possono descrivere la termodinamica e la cinetica rappresentative dello scenario in esame determinando inoltre i principali flussi di reagenti e prodotti in gioco così da poterli inserire nel modello successivamente sviluppato.

Nel terzo capitolo sono elencate le principali condizioni al contorno e condizioni iniziali che permettono la risoluzione dei bilanci energetici, bilanci di massa e i bilanci di quantità di moto.

Le procedure utilizzate nelle prove sperimentali condotte nel 2008 a Genova sono descritte nel quarto capitolo insieme ai principali risultati ottenuti riguardanti le concentrazioni di monossido di carbonio l'ossigeno e la temperatura interna alla galleria.

Nel quinto capitolo sono descritti i principali risultati ottenuti dalle simulazioni alle varie condizioni ambientali e le considerazioni fatte dopo i confronti con i dati sperimentali.

Nella parte finale dell'elaborato sono esposte le principali conclusioni tratte dopo il confronto tra i dati ottenuti dalle simulazioni e i dati raccolti nelle prove reali e le possibili

migliorie da apportare al modello per ridurre al minimo le approssimazioni sostenute e migliorare la precisione e l'accuratezza del modello.

# Capitolo 1

## Sicurezza nelle gallerie stradali

### 1.1 Le gallerie stradali

Le gallerie stradali rappresentano una tipologia di infrastruttura molto importanti, infatti queste costruzioni permettono di superare ostacoli naturali come le montagne senza doverle aggirare e quindi riducendo le pendenze e il tragitto percorso.

In Italia sono presenti il maggior numero di chilometri di galleria in confronto con il resto dell'UE, infatti con ben 1400 Km di galleria coprono circa il 28% della lunghezza totale delle gallerie nell'UE.

Le gallerie oltre ad essere un comodo collegamento tra mete altrimenti raggiungibili con lunghi tragitti, presentano un possibili scenario di incidente dove l'evacuazione e il soccorso delle vittime risulta molto più arduo, proprio per la loro particolare aspetto costruttivo.

Il passato italiano è segnato da molti incedenti stradali e incendi in gallerie, fortunatamente solo pochi di certo rilievo, tra cui ricordiamo quello della galleria del Monte Bianco (marzo '99), quello del traforo di Taurin in Austria (maggio '99) e quella della Funicolare di Kaprun (novembre '00).

#### 1.1.2 Classificazione delle gallerie

In Italia e in tutto il mondo ci sono più tipologie di trafori.

Una prima classificazione viene fatta tra gallerie naturali, cioè quelle che presentavano già un collegamento tra i due lati della montagna prima dell'intervento dell'uomo, e quelle artificiali, cioè quelle costruiti interamente dall'uomo.

Un'altra divisione viene fatta sulla tipologia dei mezzi che transitano nella galleria, dove troviamo i tunnel stradali che permettono il transito di solo autoveicoli, i tunnel ferroviari costruiti per consentire il passaggio dei treni e i tunnel delle metropolitane.

Una seguente distinzione viene eseguita in funzione del numero delle canne, poiché esistono gallerie a singola o a doppia canna.

Una diversa classificazione delle gallerie prevede una divisione in cinque classi che viene determinata in funzione delle caratteristiche strutturali (lunghezza, numero di corsie, singola o doppia canna), alle quali corrispondono specifici requisiti minimi per garantire la sicurezza. Questi requisiti saranno discussi nel dettaglio nel paragrafo 1.4.



Figura 1: Quello che resta di un veicolo coinvolto nell'incidente nel traforo del Monte Bianco nel 1999

Nella tabella 1, sono elencati i principali incidenti avvenuti nel mondo dal 1949.

Tabella 1: Elenco dei principali incidenti in galleria avvenuti in tutto il mondo

Anno	Nome galleria	Nazione	Lunghezza [m]	Numero morti	Numero feriti	Veicoli Bruciati	Causa
1949	Holland	USA	2250	-	66	23	Caduta del carico
1978	Velsen	Olanda	770	5	5	6	Collisione
1979	Nihonzaka	Giappone	1045	7	2	173	Collisione
1980	Sakai	Giappone	459	5	5	10	Collisione
1982	Caldecott	USA	1028	7	2	8	Collisione
1983	Pecrile	Italia	600	8	22	10	Collisione
1986	L'armè	Francia	1105	3	5	5	Collisione
1987	Gumefens	Svizzera	340	2	-	3	Collisione
1993	Serra Ripoli	Italia	442	4	4	16	Collisione
1994	Hugouenot	Sud Africa	6111	31	28	1	Incendio al motore di un pullman
1995	Pfaender	Germania	6719	53	4	4	Collisione
1996	Femmine	Italia	148	5	10	20	Collisione
1999	M. Bianco	Italia	11600	39	-	26	Incendio a seguito di una perdita
1999	Tauren	Austria	6400	12	-	40	Collisione
2003	Vicenza	Italia	550	6	50	-	Ribaltamento
2001	San Gottardo	Svizzera	16918	11	-	4	Collisione

## 1.2 Il rischio in galleria

L'analisi del rischio è una disciplina che mira a determinare il livello di rischio presente all'interno di specifici ambienti in determinate condizioni.

L'analisi del rischio è applicata ormai da molti anni al campo stradale per identificare le cause e gli elementi che favoriscono l'aumento e il propagarsi degli incidenti durante i trasporti su strada.

In queste analisi hanno un peso fondamentale sia lo stato delle infrastrutture (strade, gallerie, segnaletica, segnalatori luminosi), sia il comportamento degli utenti durante la guida.

Questa tipologia di analisi può essere applicata anche alle gallerie stradali durante il loro normale funzionamento, adottando un approccio specifico per questa tipologia di ambiente

### 1.2.1 Teoria del rischio

Generalmente il rischio viene definito dal seguente prodotto:

$$R = F \times M \quad \text{Equazione 1.1}$$

Dove "F" rappresenta la frequenza con cui potrebbe avvenire un determinato scenario, invece "M" la magnitudo dell'incidente, calcolabili attraverso una delle correlazioni "Probit Analysis" disponibili in letteratura

Per la determinazione del rischio in una galleria, bisogna tener conto di:

- caratteristiche geometriche (lunghezza, pendenza, sistema di illuminazione, ecc.);
- caratteristiche dei sistemi di sicurezza di cui è dotata;
- volume di traffico.

### 1.2.2 Possibili scenari

La maggior parte degli scenari di incidenti che si presentano in galleria, comprendo la presenza di veicoli, però la causa e la tipologia degli scenari dipendono dalla natura del veicolo e dalla sequenza degli avvenimenti.

Un incidente in galleria è uno scenario non molto frequente proprio per il fatto che gli autisti delle automobili o di altri mezzi prestano molta più attenzione alla guida a causa dell'ambiente chiuso e della visibilità limitata, infatti molto spesso la causa iniziale di un incidente deriva dalla fermata forzata o improvvisa di un veicolo o dalla distrazione dell'autista.

Nella tabella seguente sono descritte le principali cause di fermata in galleria.

Tabella 2: Principali cause che determinano la fermata di un veicolo in un traforo

<b>Causa della fermata</b>	<b>Frequenza (%)</b>
<b>Guasto meccanico/elettrico</b>	58
<b>Perdita del carico</b>	17
<b>Foratura del pneumatici</b>	2.5
<b>Urto tra veicoli</b>	1.8
<b>Urto con parete laterali</b>	1.5
<b>Incendio del veicolo</b>	1.2
<b>Altri motivi</b>	18

Ovviamente quelle riportate nella tabella 2 sono le cause della fermata del primo veicolo, ma qualora nell'incidente finali siano coinvolti più veicoli, la causa dell'urto deriva dalla distrazione dei guidatori e/o dalla mancanza del rispetto delle distanze di sicurezza.

In una galleria potrebbero verificarsi dei scenari che non comprendono delle collisioni tra veicoli o comunque degli incidenti stradali. Nella tabella 3 sono elencati alcuni possibili scenari con i rispettivi pericoli che si potrebbero presentare all'interno di un traforo.

Tabella 3: Possibili scenari e rispettivi pericoli che si possono presentare in una galleria

<b>SCENARI INCIDENTALI</b>	<b>PERICOLI PRINCIPALI</b>
<b>Rilascio di sostanze chimiche basso bollenti</b>	Gas tossici
<b>Rilascio di sostanze chimiche alto bollenti</b>	Liquidi tossici
<b>Rilascio di gas liquefatto</b>	Vapore/liquidi tossici – Effetti di pressione
<b>Incendio di un mezzo pesante (carico e/o scarico)</b>	Effetti termici - fumo
<b>Pool fire</b>	Effetti termici - fumo
<b>Esplosione di una nube di una nube di vapore (VCE)</b>	Effetti termici e di pressione – fumo

Per avere un'inquadratura completa dei possibili scenari, ci si può comunque rifare ad un albero degli eventi, sviluppato per l'ambiente delle gallerie

## 1.3 Incendi in galleria

In questa studio tratteremo solamente gli incendi di pozza e l'incendio di mezzo leggero. Anche se la frequenza degli incendi in gallerie stradali non è altissima, le conseguenze, proprio a causa delle condizioni in cui avviene lo scenario potrebbe essere disastrose.

Le principali cause di un incendio in gallerie sono:

- Collisioni (tra veicoli e/o con le pareti laterali: la frequenza di questa causa è più bassa rispetto al caso in cui ci troviamo in ambiente aperto, proprio per il fatto che statisticamente le persone alla guida di un veicolo all'interno in una galleria mantiene una velocità di marcia minore);
- Difetti o guasti meccanici e/o elettrici ad un veicolo in transito (la frequenza risulta identica a quella di un guasto simile che avviene in ambiente aperto);
- Difetti o guasti meccanici e/o elettrici ad un'apparecchiatura già presente all'interno della galleria (frequenza molto più bassa rispetto alle altre due cause) .



Figura 2: Vigili del fuoco intervenuti in un incidente stradale dentro una galleria

### 1.3.1 Limiti e rischi del CO

Durante una reazione di combustione si sviluppano i cosiddetti gas di combustione, cioè quei prodotti che permangono anche se raffreddati ad una temperatura di circa 15 gradi. Uno dei principali pericoli derivanti da un incendio in un ambiente chiuso, come i tunnel, è l'accumulo di questi gas che possono portare ad un aumento della concentrazione di monossido di carbonio e ad una diminuzione della concentrazione di ossigeno. Infatti perché l'uomo possa respirare, l'aria deve contenere almeno il 17 % di ossigeno.

In condizione normali l'aria è costituita mediamente da:

- 20,94 % di ossigeno;
- 79,09 % di azoto;
- 0,03 % di anidride carbonica;
- 0,78 % di argon;

- 0,01 % di altri gas.

Le statistiche dicono che la principale causa di morte durante un incendio non sono le ustioni riportate e/o le elevate temperature, ma bensì dall'elevata concentrazione dei prodotti di combustione inalati e dalla ridotta concentrazione di ossigeno, infatti perché l'uomo possa respirare, l'aria deve contenere almeno il 17 % di ossigeno.

Tra i possibili prodotti di combustione ricordiamo:

- Anidride carbonica: si sviluppa da una combustione completa, e porta ad un'accelerazione del battito cardiaco. È letale se presente con una concentrazione maggiore del 10%.
- Ossido di carbonio: deriva da una combustione incompleta, cioè con un difetto di aria rispetto a quella richiesta dalla reazione. Risulta pericoloso anche in basse concentrazioni, poiché grazie alla sua affinità con l'emoglobina interviene nel processo di ossigenazione del sangue interrompendo la formazione dell'ossiemoglobina, provocando una ipossia anemica.

Gli effetti del monossido di carbonio, riportati nella tabella 4, dipendono ovviamente dalla concentrazione e dal tempo di esposizione.

Tabella 4: Effetti del monossido di carbonio sull'uomo.

Concentrazione volumetrica	Effetti sull'uomo
0.05 %	Può risultare mortale
0.15 %	Può risultare mortale
0.4 %	Fatale in meno di un'ora
1.3 %	Perdita di coscienza in pochi secondi – Fatale in pochi minuti

- Anidride solforosa: è presente tra i gas di combustione se avviene una reazione che comprende composti con presenza di zolfo ed un eccesso d'aria. Provoca irritazione alle vie di respirazione, occhi e mucose. Per concentrazioni minime dello 0.05 % risulta pericoloso anche per esposizioni di breve durata
- Ammoniaca: si sviluppa dalla combustione di sostanze contenenti azoto o negli incendi che coinvolgono impianti di refrigerazione. Provoca irritazioni alla mucose, agli occhi e alle vie respiratorie.
- Perossido di azoto: si forma insieme a vapori nitrosi. Si presenta in un colore bruno. Molto tossico, infatti risulta mortale anche con concentrazioni inferiori allo 0.1 %.
- Fumi: formazioni di piccole particelle solide (principalmente carbonio) e liquide (vapore acqueo) disperse nell'aria. Provocano un riduzione della visibilità in funzione della loro concentrazione.
- Calore: Principale causa che determina l'aumento delle temperature. Può provocare danni a cose e persone, anche in forma letale. L'aumento di temperatura compisce principalmente i tessuti esterni (disidratandoli) e le vie respirazione, provocando ustioni. In presenza di aria secca la temperatura massima sopportabile per brevissimi tempi dall'uomo è di 150 °C, ma poiché nell'aria durante un incendio è



sempre presente un certo quantitativo di vapore acqueo, questo limite si sposta a 60/70°C

## 1.4 Requisiti minimi delle nuove gallerie

Negli ultimi anni le tecniche con cui sono state costruite le gallerie stradali sono cambiate molto, tenendo in considerazione la sicurezza delle persone che attraversano questi tunnel e dei soccorritori che devono intervenire in caso di bisogno. Sono stati infatti migliorati i sistemi di ventilazione, come anche i sistemi di illuminazione, di segnaletica e tutte le procedure che permettono alle persone di raggiungere le uscite di sicurezza in caso di incidente.

La sicurezza nelle gallerie stradali tuttavia non dipende solo dai sistemi di emergenza e dal loro funzionamento, infatti un elemento di rilievo in caso di un incidente in un ambiente confinato come le gallerie, è il comportamento che tengono le persone durante le procedure di evacuazione. Gli utenti in caso di pericolo devono riuscire a raggiungere le zone predisposte anche se prese dal panico e ancora più difficile in caso di presenza di fumo, il quale può ridurre notevolmente la visibilità.

Proprio per risolvere questo problema è stato creato il Decreto 05/10/2006, dove tra i vari requisiti questa legge prevede per alcune particolari gallerie dei sistemi luminosi lungo le pareti delle gallerie che permettono alle persone di seguire la giusta traiettoria anche in presenza di una notevole quantità di fumo.

### 1.4.1 Decreto 05/10/2006

La norme che regolarizzano le disposizioni di sicurezza in galleria sono contenute nel Decreto 05/10/2006, il quale fissa gli obiettivi da perseguire per garantire un funzionamento delle gallerie stradali in completa sicurezza. Per far questo sono stati determinati dei requisiti minimi che devono essere presenti in tutte le gallerie con una lunghezza superiore ai 500 m e definiti quelle cariche che devono organizzare e dirigere i lavori di adeguamento e mantenimento di tali requisiti.

Poiché in Italia, ma anche in Europa sono in uso moltissimi tunnel costruiti in anni in cui le tecnologie disponibili erano molto limitate, questo decreto introduce anche le azioni da intraprendere per portare i rischi presenti ad dei valori inferiori rispetto a quelli di soglia. Secondo questo decreto l'analisi del rischio è l'unico metodo per valutare l'effettiva sicurezza nei trafori.

Questa direttiva introduce delle nuove cariche che sono più o meno responsabili di assicurare la sicurezza all'interno delle gallerie. I ruoli individuati sono:

- autorità amministrative
- gestore della galleria;
- responsabile della sicurezza;

- ente per le ispezioni.

L'autorità amministrativa viene nominata dallo stato membro ed ha la responsabilità generale per quanto riguarda la sicurezza degli utenti che utilizzano la galleria e del personale di servizio. I compiti principali dell'autorità amministrativa sono quelli di definire i requisiti dei controlli da svolgere, quella di organizzare per il personale di servizio e di primo intervento i corsi di formazione e la fornitura degli equipaggiamenti necessari.

Un altro compito che svolge l'autorità amministrativa è quello di precisare i compiti affidati al responsabile della sicurezza e di attuare tutte le misure per ottenere una riduzione dei rischi all'interno del tunnel. Questa figura può prevedere anche alla chiusura di una o più gallerie per permettere attività di verifica o di formazione del personale di emergenza

Se una galleria trans-europea attraversa il territorio di due stati membri, allora devono essere nominate due autorità amministrative; uno per ogni stato.

La figura del gestore può essere ricoperta da un organismo pubblico o privato ed è responsabile di tutto quello che riguarda la gestione della galleria.

Qualora un tunnel sia situato in due diversi stati dell'unione europea, viene nominato comunque un solo gestore che in caso di incidente o in qualsiasi caso di rilievo, dovrà redigere un rapporto che verrà consegnato all'autorità amministrativa. I principali compiti di questa figura sono quelli di garantire la sicurezza degli utenti, controllare la funzionalità di tutte le apparecchiature installate all'interno del traforo e di organizzare tutte le attività di manutenzione.

Il responsabile della sicurezza, designato dal gestore e approvato dall'autorità amministrativa, ha il compito principale di coordinare tutte le misure preventive e di salvaguardia degli utenti e dei soccorritori. Questa figura ha la massima libertà di decisione in tutte le questioni di sicurezza riguardanti la galleria. Gli altri incarichi di questa figura sono quelli di assicurare il coordinamento con i vari servizi di pronto intervento, di partecipare alla creazione dei piani operativi e dei piani di sicurezza e di formare il personale che interverrà in caso di emergenza.

L'ente per le ispezioni ha la mansione di effettuare almeno due ispezioni all'anno e qualora riscontrasse qualche violazione della direttiva 05/10/2006 dovrà avvisare l'autorità amministrativa la quale informerà direttamente il gestore del traforo.

### ***1.4.2 Requisiti minimi nelle gallerie***

I requisiti minimi elencati nella direttiva comprendono tre categorie principali a seconda di come il volume di traffico e la lunghezza caratterizzano la galleria. Queste tre classi sono

- requisiti obbligatori: numeri di fornice e corsie
- requisiti obbligatori con eccezioni: illuminazione, ventilazione e sistema antincendio;
- non obbligatori: segnaletica, centri di controllo, impianti di sorveglianza e sistemi di comunicazione.

Per le gallerie con una lunghezza superiore ai 500 metri le installazioni minime richieste sono:

- Vie di fuga: devono essere predisposte delle uscite di sicurezza adeguatamente indicate con segnali stradali e luminosi;
- Estintori: devono essere posizionati all'ingresso e all'uscita delle gallerie e lungo il tunnel ad una distanza massima di 150 m tra un apparecchio e quello successivo
- Impianto di radiodiffusione: deve essere presente in tutte le gallerie. In caso di emergenza deve essere sospese tutte trasmissioni radio per poter trasmettere i messaggi in modo da favorire le operazioni di evacuazioni
- Piazzole di sosta: devono essere presenti delle piazzole di sosta che permettano agli autoveicoli in panne di potersi fermare al di fuori della carreggiata, senza aumentare il rischio di collisioni.



# CAPITOLO 2

## Il modello fisico

Per procedere con una simulazione bisogna innanzitutto capire cosa avviene su scala macroscopica all'interno del nostro sistema.

In questo capitolo andremo ad individuare quali sono i fenomeni veramente importanti da prendere in considerazione per ottenere una descrizione dettagliata del fenomeno.

### 2.1 Fenomeni in studio

Il fenomeno dello studio è un incendio di pozza all'interno di un condotto dove siano presenti sia flussi convettivi sia flussi diffusivi.

Durante un incendio si presentano diversi fenomeni, come l'aumento di temperatura, lo sviluppo di sostanze nocive, la variazione dei campi di moto, ecc.

Se l'incendio si sviluppa all'interno di un ambiente confinato come una galleria stradale questi fenomeni possono aumentare di rilievo.

In questo studio ci concentreremo sui campi di moto che si creano a seguito di una reazione di combustione, sullo studio della propagazione dei principali gas di combustione, sulla diminuzione dell'ossigeno e sulla variazione della temperatura all'intero del dominio, ovvero una galleria stradale.

Durante le prove sperimentali sono state eseguite più prove, le quali si distinguevano dai diametri delle pozze e quindi dal quantitativo del combustibile iniziale.

La quantità di petrolio inserito nella pozza non influenza i KW emessi, in quanto questi sono in funzione solo del diametro della pozza, come evidenziato successivamente nell'equazione 2.3, poiché la reazione di combustione nel caso di incendi di pozza coinvolge solo la superficie superiore della pozza. Cambiando i quantitativi di combustibili, quello che varia è solo la durata dell'incendio.

Si è deciso di simulare la prova con una pozza del diametro di 6,2 cm in quanto la durata di combustione, stimato tra i 7 e 10 minuti risulta un buon equilibrio tra livello computazionale richiesto e tempi di analisi.

## 2.2 Analisi preliminari

Per procedere con la simulazione di un incendio di pozza, bisogna innanzitutto determinare la portata di combustibile che si libera in fase gas, poiché è questa che partecipa alla reazione di combustione una volta che la sua percentuale è compresa tra i due limiti d'infiammabilità.

Per determinare la portata di combustibile bisogna prima determinare la temperatura della pozza, poiché l'equilibrio liquido vapore è influenzato principalmente dalla temperatura e dalla pressione, che però a differenza della prima variabile, rimane pressoché costante.

### 2.2.1 Temperatura della pozza

Per il calcolo della temperatura sono stati considerati gli scambi termici che il fluido combustibile ha con l'aria circostante, con il terreno e quello più importate cioè il trasferimento di calore attraverso meccanismi convettivi e d'irraggiamento e seguito della stessa reazione di combustione.

Essendo la pozza di gasolio situata all'interno della galleria, è stato deciso di non considerare l'irraggiamento proveniente dal sole.

La temperatura della pozza è descritta dal bilancio di energia per la temperatura media di un liquido:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A}{(Cp * rho * V)} (H - \rho u_r L_v) \quad \text{Equazione 2.1}$$

Dove:

A: area superiore della pozza [m<sup>2</sup>];

Cp: calore specifico del liquido [J/KgK];

H: flusso di calore [J/m<sup>2</sup>s];

L<sub>v</sub>: calore latente di vaporizzazione [J/Kg];

t: tempo [s];

T: temperatura media del liquido [K];

u<sub>r</sub>: velocità di regressione della superficie superiore [m/s];

V: volume della pozza [m<sup>3</sup>];

ρ: densità del liquido [Kg/m<sup>3</sup>].

Come si vede nell'equazione 2.2 per il calcolo della flusso di calore H, abbiamo considerato lo scambio di calore con l'aria (H<sub>a</sub>), quello con il suolo (H<sub>s</sub>) e la somma del calore

convettivo e irraggiamento derivante dalla reazione di combustione rappresentato dal termine  $H_r$ .

$$H = H_a + H_s + H_r \quad \text{Equazione 2.2}$$

Per la determinazione di questo ultimo termine è stata utilizzata l'equazione 2.3 ricavata dallo "Yellow Book" specifica per il gasolio, che esegue una stima dei  $W$  emessi attraverso una correlazione empirica.

$$H_s = C3 * e^{-(C5*D)} + C4 * (1 - e^{-(C5*D)}) \quad \text{Equazione 2.3}$$

Dove:

$D$ : diametro della pozza [m];

$C3, C4, C5$ : coefficienti.

Tale combustione risulta essere stazionaria, cioè i  $W$  emessi possono essere ritenuti costanti durante tutta la durata dell'incendio

Una delle principali ipotesi che sono state fatte fino a questo punto è nella composizione del liquido, poiché essendo il gasolio una miscela di idrocarburi  $C_{10}$ - $C_{15}$ , è stato impossibile determinare la proprietà della miscela per una composizione univoca e quindi ci siamo basati sulle proprietà di un  $C_{12}$  e precisamente il  $C_{12}H_{23}$ .

Sviluppando il bilancio termico con uno script di *Matlab* abbiamo ottenuto il seguente grafico, che illustra la variazione della temperatura media della pozza nel tempo.

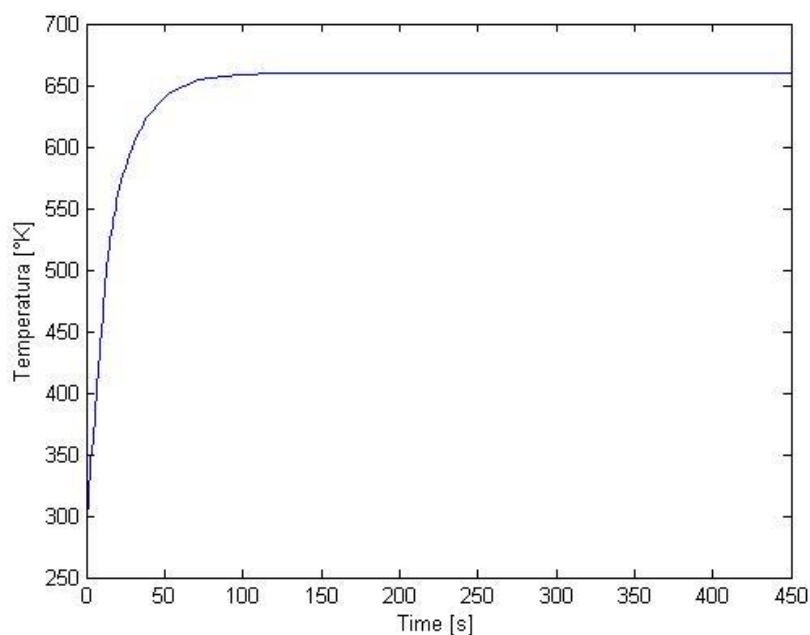


Figura 2.1: Variazione della temperatura di una pozza di 12 ml di gasolio.

Dal grafico prodotto, si può notare che la variazione della temperatura nel tempo sia molto repentina, proprio a causa delle dimensioni ridotte della pozza utilizzate durante le prove a Genova. Come si può vedere nella figura 2.1, la temperatura ha un incremento di circa di 400 gradi in meno di due minuti e poi si stabilizza a una temperatura di circa 650 °C fino alla fine della reazione di combustione. Questo andamento molto repentino è causato dalle ridotte dimensioni della pozza, infatti il bilancio è stato impostato su un volume iniziale di 12 ml cioè circa 9 grammi di gasolio.

Provando ad applicare lo stesso studio ad una pozza di dimensioni più grandi (circa 10 volte più grandi), si può notare (figura 2.2) che il profilo della temperatura cambia molto, infatti assume per i primi minuti un andamento più lineare, per poi curvare lentamente. Si osserva inoltre che la temperatura finale cui arriva la pozza è molto inferiore, si ottiene un incremento totale di circa novanta gradi.

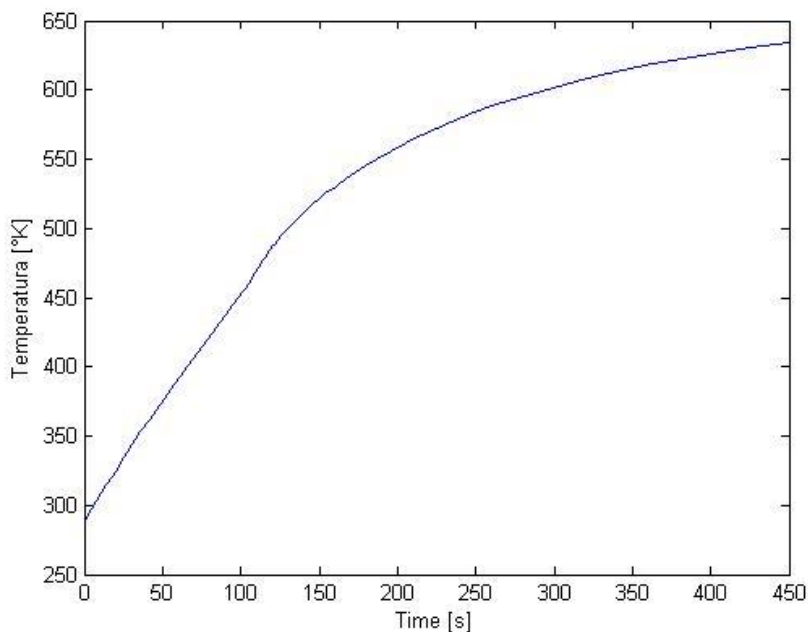


Figura 2.2: Variazione della temperatura di una pozza di 120 ml di gasolio.

### 2.2.2 Valutazione della variazione della portata di vapore

Per la valutazione della portata di vapore che si libera dalla pozza sono state utilizzate dell'equazioni presenti nello "Yellow Book".

Uno dei principali parametri che influenzano il flusso di combustibile è la costante di *mass transfert* del gasolio in aria, la quale è stata ricavata dall'equazione 2.4

$$K(T) = 2Cm(u_{10})^{0.78} \left(\frac{D}{2}\right)^{-0.11} (Sc)^{-0.67} \quad \text{Equazione 2.4}$$



Dove:

$C_m$ : coefficiente;

$u_{10}$ : velocità del vento ad una altezza di 10 m [m/s];

$D$ : diametro pozza;

$Sc$ : numero di *Schmidt*.

Grazie alla costante di *mass transfert* è stato possibile ricavare, attraverso l'equazione 2.5, la portata di vapore di gasolio che si libera dalla pozza

$$q = k(T) * c_i \quad \text{Equazione 2.5}$$

Dove  $c_i$  è la concentrazione del combustibile appena al di sopra della superficie del liquido. Questo parametro è approssimabile alle pressione di saturazione  $P_{sat}(T)$  del liquido calcolato alla temperatura presente appena sopra la pozza.

Dalla Figura 2.5 si può notare che la portata di vapore che si libera è pressoché nulla nei primi istanti dopo l'ignizione e poi aumenta velocemente fino a stabilizzarsi quando anche la temperatura raggiunge un valore costante. La retta rossa evidenzia la portata media calcolata nel *range* di tempo della combustione e nel caso in esame è di circa 0.019 grammi al secondo.

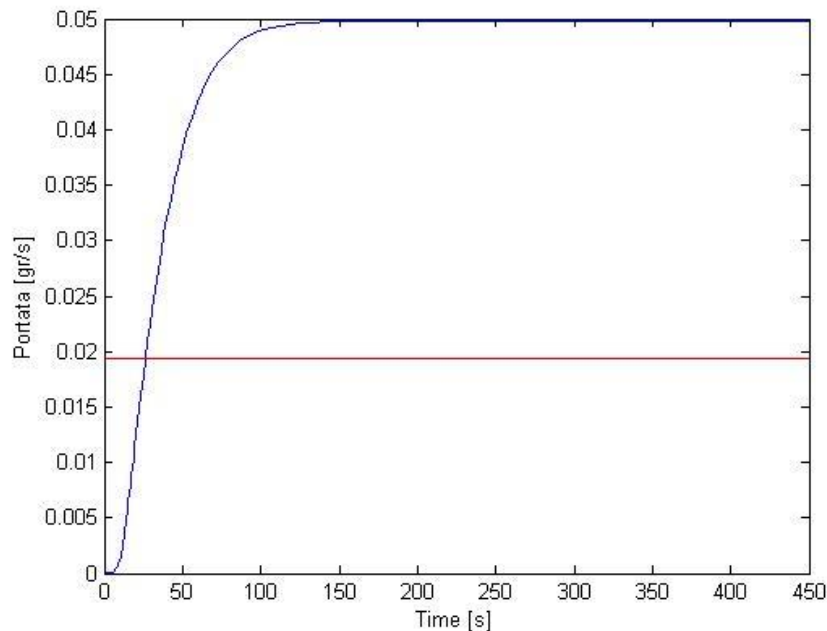


Figura 2.3: Variazione della portata di gasolio che si libera da una pozza di 12 ml.

Considerando questo valore di portata media di gasolio e un volume iniziale di combustibile pari a 12 ml, qualora la reazione di combustione partisse all'istante temporale zero, il tempo

con il quale si esaurirebbe il gasolio e quindi l'intervallo di tempo in cui avviene la combustione è di circa 508 secondi.

Dai dati sperimentali, meglio descritti nel capitolo 4, si riscontra un tempo di combustione di circa 470 secondi.

Come per la temperatura, se aumentassimo il quantitativo iniziale di combustibile presente nella pozza, l'andamento della portata nel tempo varia molto, presentando un aumento più ridotto, infatti poiché la temperatura aumenta più lentamente rispetto alla pozza di piccole dimensioni anche la portata avrà un incremento più lento inferiore rispetto al caso precedente

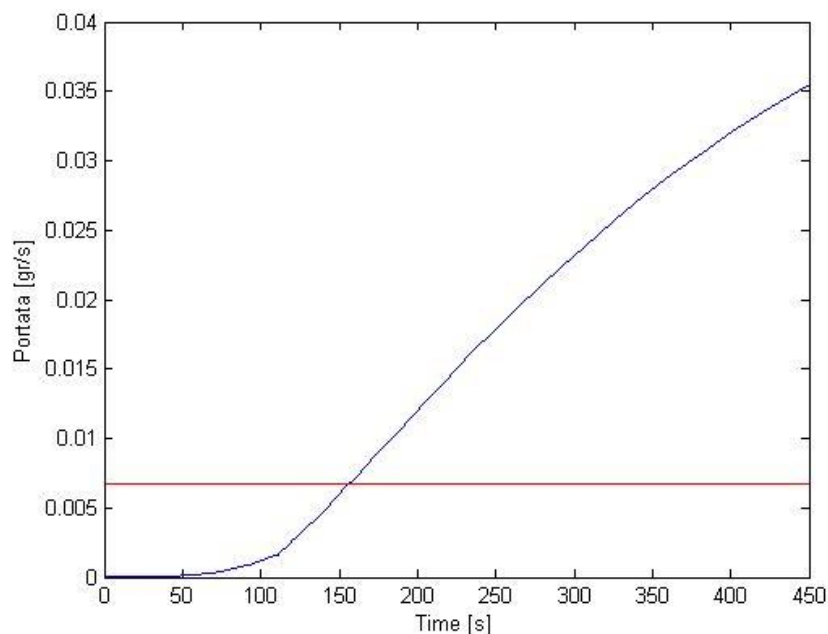


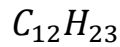
Figura 2.4: Variazione della portata di gasolio che si libera da una pozza di 120 ml.

## 2.3 Reazione Chimica

Il gasolio è generalmente definito come un prodotto della distillazione primaria del greggio e fino a non molti anni fa, la sua qualità, dipendeva sostanzialmente dalle caratteristiche del greggio stesso e dalle modalità di distillazione.

Proprio per questo motivo la composizione e le caratteristiche di questo combustibile non sono univocamente determinate. Normalmente sono considerati come principali componenti del gasolio gli idrocarburi che presentano un numero di atomi di carbonio compreso tra dieci e quindici.

Per ovviare a questo problema e semplificare le future simulazioni è stato deciso di considerare come unico reagente combustibile l'idrocarburo con la seguente formula bruta:



Una seconda incognita riscontrata in questo lavoro è l'effettiva cinetica della reazione di combustione del gasolio che avviene all'interno della galleria in scala, durante l'incendio di pozza poiché come riportato nel libro "*Combustion*", di Glassman I. e di R. A. Yetter, lo schema cinetico di una reazione di combustione è composta da più di cento tra reazioni principali e secondarie. Queste reazioni tengono conto, oltre ai principali reagenti e prodotti come monossido di carbonio, anidride carbonica e vapore acqueo, anche moltissimi altri composti derivanti da tutte quelle sostanze contenute nel gasolio insieme ai principali idrocarburi.

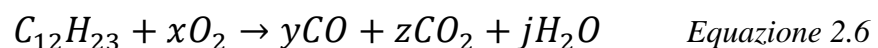
Inoltre nel caso specifico di un incendio in galleria, lo schema è complicato dal fatto che la combustione può avvenire in difetto d'aria.

Le uniche informazioni sulla cinetiche ricavate dalle prove sperimentali sono il completo consumo del gasolio e la formazione di monossido di carbonio tra i vari prodotti (rilevato tramite un gascromatografo per tutta la durata della combustione), nonché il consumo d'ossigeno durante la prova.

Il fatto che tra i vari gas di combustione sia presente anche il CO non ci sorprende, infatti questo prodotto normalmente è presente delle reazioni di ossidazione che avvengono in ambienti con un difetto di ossigeno. Le gallerie stradali sono un ambiente che rispecchia questa caratteristica in quanto hanno un solo ingresso di ossigeno limitato dalle condizioni atmosferiche, il quale però in condizioni normali non garantisce un afflusso d'aria sufficiente per avere un bilancio completo di ossigeno.

Per ovviare a tutte queste incognite e per ridurre i tempi di calcoli è stato deciso di ipotizzare degli schemi cinetici, descritti nel libro "*Combustion*", di Glassman I. e di R. A. Yetter, che prevedono come unici reagenti il dodecano e l'ossigeno e come unici prodotti di combustione il monossido di carbonio, l'anidride carbonica e il vapore acqueo.

La reazione generale di combustione, considerando che il combustibile utilizzato vada ad esaurimento come nelle prove sperimentali è rappresentata nell'equazione 2.6



Nella combustione abbiamo considerato come unici prodotti nel caso di una reazione irreversibile il monossido di carbonio, l'anidride carbonica e l'acqua.

Le lettere "*x, y, z e j*", rappresentano i coefficienti molare per la combustione di una mole di combustibile.

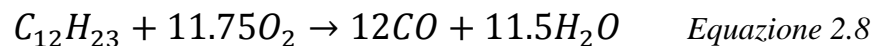
Poiché i valori di questi coefficienti dipendono da molti fattori e non sono univocamente determinati per un caso come il nostro, cioè in un ambiente parzialmente confinato, ma comunque aperto, abbiamo deciso di sviluppare lo studio su due strade differenti, le quali si differenziano nella cinetica di reazione presa in esame.

In uno primo caso, considereremo una combustione completa che sviluppa monossido di carbonio e anidride carbonica in forma equimolare, ottenendo quindi la reazione:



In un secondo caso prenderemo in considerazione una reazione completa e irreversibile che sviluppa come prodotti il monossido di carbonio e il vapore acqueo, e una seconda reazione applicata all'intero dominio della galleria, che rappresenterà l'ossidazione del monossido di carbonio ad anidride carbonica.

Le due reazioni sono quindi:



Un approccio alla stima del monossido di carbonio presente, può basarsi sullo studio delle reazioni evidenziate nell'equazioni 2.8 e 2.9.

Per la seconda reazione è stata sono stati individuate due serie di parametri cinetici, presenti in letteratura da inserire nella simulazione, essendo questa una reazione di equilibrio che avviene nel tempo e successivamente alla prima.

*Tabella 2.1: Parametri cinetici della reazione rappresentata nell'equazione 2.9*

<b>Energia di attivazione (E<sub>a</sub>)</b>	<b>Parametro pre-esponenziale (A)</b>
<b>47700 J/mol</b>	2.5E+09
<b>48000 J/mol</b>	3.4E-07

Per semplificare il livello computazione richiesto dal sistema appena descritto è stato deciso di non simulare la reazione di combustione, ma di calcolare la portata e la composizione

dei gas di combustione con uno script di *Matlab* e quindi di inserire nel modello in *Comsol* un termine sorgente in prossimità della pozza.

Sempre in prossimità della pozza è stato inserito un termine di consumo, specifico per l'ossigeno.

Quindi per il primo caso descritto nell'equazione 2.7, simuleremo un ingresso di gas di combustione dalla superficie superiore della pozza e un consumo di ossigeno che rispecchino la cinetica descritta da questa reazione.

Nel secondo studio, considereremo un termine sorgente che mi rappresenterà i gas di combustione che si sviluppano dalla reazione e un consumo di ossigeno che rispecchino la cinetica illustrata nell'equazione 2.8. In parallelo a questa reazione verrà considerata quella di equilibrio tra CO e CO<sub>2</sub>, evidenziata nell'equazione 2.9, in tutta il volume in studio.

## 2.4 Coefficienti di diffusione

Nella simulazione della combustione e quindi nello studio dei profili di concentrazione bisogna considerare sia i flussi convettivi sia i flussi diffusivi. Se i primi dipendono principalmente dalla velocità all'interno del tunnel i secondo come esprime la legge di Fick dipendono dal coefficiente di mutua diffusione.

È stato scelto di utilizzare la correlazione di Fuller (Equazione 2.6), la quale esprime il coefficiente in dipendenza dalle interazioni del componente in studio con l'aria e alle condizioni di temperatura e di pressione alla quale ci troviamo:

$$D_{AB} = \frac{10^{-3} T^{1.75} \sqrt{PM_{AB}}}{P [(\sum v)_A^{\frac{1}{3}} + (\sum v)_B^{\frac{1}{3}}]^2} \quad \text{Equazione 2.10}$$

Dove:

T: temperatura [K];

P: pressione [bar];

( $\sum v$ )<sub>i</sub>: sommatoria di tutti i volumi atomici di diffusione delle specie. Per l'aria vale 19.7, per la CO 18, per la CO<sub>2</sub> corrisponde a 26.9 e per l'ossigeno 16.3;

Il  $PM_{AB}$  deriva dalla sommatoria dei vari pesi molecolari delle due specie, secondo l'equazione 2.7.

$$PM_{AB} = \left( \frac{1}{PM_A} \right) + \left( \frac{1}{PM_B} \right) \quad \text{Equazione 2.11}$$

## 2.5 Costruzione geometria del tunnel in scala

Per la simulazione dell'incendio abbiamo ricostruito tramite il programma "COMSOL", la galleria utilizzata nelle prove sperimentali a Genova nel 2008, rappresentante una riproduzione in scala 1:30 (tranne per la lunghezza), della galleria "Brasile" situata nell'autostrada A7 Genova - Milano. Le prove sono state effettuate in un condotto in calcestruzzo lungo 5 m con un raggio interno di 0,15 m, uno spessore della struttura di 2 cm e con un'altezza libera tra l'arcata superiore e la pavimentazione è di 0,2 m. Nella simulazione dell'incendio di pozza abbiamo ricostruito un campione cilindrico di petrolio bianco, detto anche petrolio lampante, con un'altezza di 0,4 cm e un diametro di 6,2 cm per un totale di combustibile di 12 ml (prova sperimentale N° 15 GED). È stato scelto di simulare l'esperimento di questo campione in quanto sperimentalmente è stato riscontrato un tempo di combustione di circa 7 minuti, considerato un tempo non troppo breve e non troppo elevato per una simulazione fluidodinamica e comunque sufficienti per valutare i fenomeni studiati

*Tabella 5: Caratteristiche geometriche della tunnel reale e del tunnel in scala 1:30*

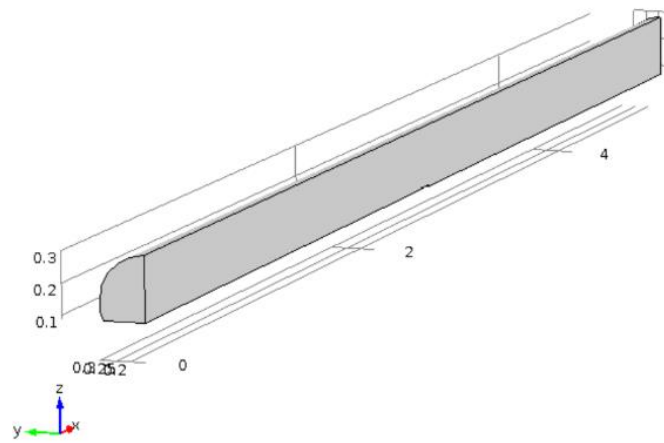
	Scala 1:30 (m)	Tunnel "Brasile" (m)
<b>Lunghezza</b>	5	718
<b>Altezza</b>	0.2	6.2
<b>Larghezza</b>	0.28	9.5
<b>Raggio idraulico</b>	0.15	4.6
<b>Raggio arcata esterna</b>	0.35	10.9

Nella simulazione abbiamo considerato solo il volume occupato dall'aria escludendo quello del calcestruzzo presente nelle pareti esterne e nella pavimentazione, questo per ridurre i tempi di calcolo che altrimenti sarebbero troppo elevati.

Un'altra semplificazione effettuata è stata la scelta di utilizzare solo metà volume dell'aria in quanto è stato scelto di sfruttare la simmetria della galleria.

Tutte queste semplificazioni sono state poi tenute conto nelle impostazioni delle condizioni al contorno, vedi capitolo 3.

A seguito di queste semplificazioni, la geometria sulla quale sono state effettuate le simulazioni in seguito descritto e rappresentata nella Figura 2.7.



*Figura 2.5: Riproduzione della geometria della galleria utilizzata durante per la simulazione*





# CAPITOLO 3

## Il modello matematico

Una volta valutato il problema su scala macroscopica bisogna ora determinare i fenomeni che avvengono su scala microscopica, così da poter risolvere il sistema risolvendo i bilanci di quantità di moto, di massa e di energia. Per far questo descriveremo le equazioni e il modello numerico utilizzato.

### 3.1 Metodo dei volumi finiti

Per la simulazione è stato utilizzato il software “COMSOL”, il quale lavora con il metodo dei volumi finiti:

Questo metodo dopo aver impostato le condizioni al contorno e le condizioni iniziali, risolve delle equazioni differenziali alle derivate parziali che rappresentano i nostri bilanci, L'intero dominio, viene diviso in tanti sotto-volumi elementari, ai quali verranno applicati i vari bilanci sotto forma integrale.

Un esempio di griglia è riportata nella figura 3.1, dove sono evidenziati i nodi con le lettere maiuscole e le facce con le lettere minuscole.

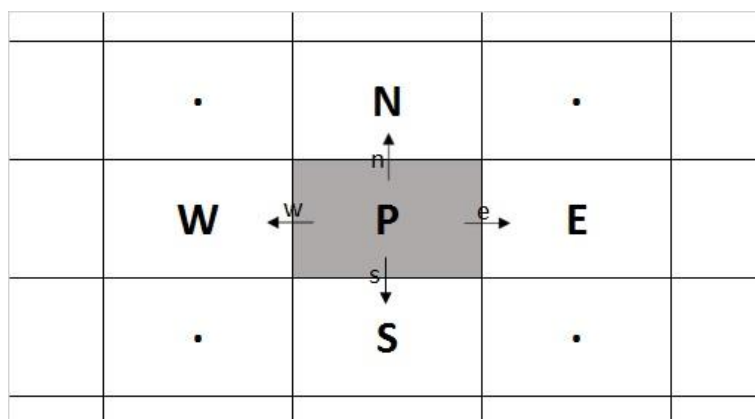


Figura 3.1: Esempio di una griglia 2D

Nel metodo dei volumi finiti, la discretizzazione dell'equazione di conservazione per la proprietà generica  $\phi$  è:

$$a_P \phi_P = \sum_{i \in I_P} a_i \phi_i + b \quad \text{Equazione 3.1}$$

### 3.2 Definizione del dominio

Come abbiamo visto nel secondo capitolo per risolvere il sistema in esame è stata sviluppata una rappresentazione della galleria tridimensionale, sulla quale sono state sviluppate le equazioni di bilancio da impostare.

Qui di seguito, viene riportata una rappresentazione delle sezione longitudinale della galleria, dove le lettere maiuscole indicano le sezioni su cui andremo a valutare le condizioni al contorno

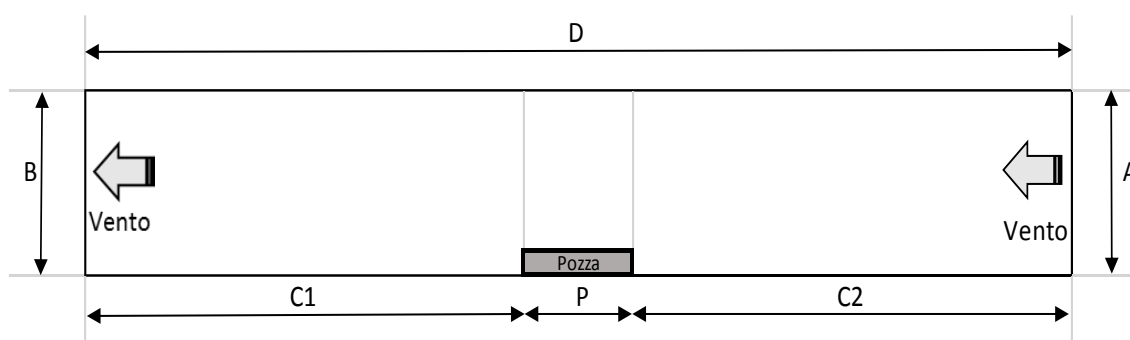


Figura 3.2: Rappresentazione 2D della galleria

#### 3.2.1 Bilanci di quantità di moto

Per la simulazione è stato deciso di utilizzare un modello turbolento, appartenente ai modelli RANS e precisamente il K-epsilon.

Questi modelli ci permettono di risolvere i bilanci senza entrare nel dettaglio delle turbolenze, ma effettuando una media delle equazioni di bilancio

Gli unici ingressi del nostro sistema sono rappresentati dalla sezione “A”, dalla quale abbiamo un ingresso continuo di aria e la sezione “P” che rappresenta l’ingresso dei gas di combustione, come termine sorgente

L’unica uscita è situata nella sezione “B”, poiché nelle sezioni “C1-C2-D” sono rappresentative delle pareti in calcestruzzo, e quindi non permettono nessuna entrata-uscita. Le equazioni rispettive per la quantità di moto, impostate per il nostro dominio sono:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \left[ -p\mathbf{l} + (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{l} - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{l} \right] + \mathbf{F}$$

*Equazione 3.1*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0$$

*Equazione 3.2*

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + \rho\varepsilon$$

*Equazione 3.3*

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{e1} \frac{\varepsilon}{k} - C_{e2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

*Equazione 3.4*

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

*Equazione 3.5*

$$P_k = \mu_T (\nabla\mathbf{u} : (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\nabla\mathbf{u})^2) - \frac{2}{3}\rho k \nabla\mathbf{u}$$

*Equazione 3.6*

Dove:

$\mathbf{u}$ : vettore delle velocità nelle tre dimensioni [m/s];

$k$ : costante cinetica turbolenta [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>];

$\varepsilon$ : epsilon [J/Kg];

$\mu_T$ : viscosità turbolenta [cP];

$\rho$ : densità [kg/m<sup>3</sup>];

$P_k$ : pressione [bar];

$C_i$ : coefficienti.

### 3.2.2 Bilanci di massa

Per quanto riguarda i bilanci di massa, abbiamo impostato le equazioni per l'ossigeno per il monossido di carbonio e per la l'anidride carbonica, in quanto per ridurre i tempi di

calcolo simuleremo solo un ingresso dei gas, determinati in base alla reazione stechiometrica di combustione, senza simulare la reazione chimica.

In un secondo studio, come già spiegato nel secondo capitolo considereremo un ingresso dei gas di combustione dalla sezione “P” contemporaneamente ad una reazione di ossidazione del monossido di carbonio, precedentemente descritta nel secondo capitolo.

Nel nostro sistema avremo quindi due ingressi di specie dalla sezione “A” e dalla sezione “P” e un’unica uscita nella sezione “B”. Qualora venga simulata anche una reazione di ossidazione all’interno del nostro volume, avremmo anche un termine di consumo.

Nelle sezioni “C1-C2-D” avremo anche in questo caso come per la quantità di moto, nessun ingresso e nessuna uscita.

Le equazioni che rappresentano i bilanci di materia sono:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + \mathbf{u} \nabla c_i = R_i \quad \text{Equazione 3.7}$$

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i + \mathbf{u} c_i \quad \text{Equazione 3.8}$$

Dove:

$c_i$ : concentrazione della specie  $i$  [mol/l];

$D_i$ : coefficiente di diffusione della specie  $i$  [m<sup>2</sup>/s];

$\mathbf{u}$ : vettore delle velocità nelle tre dimensioni [m/s];

$R_i$ : velocità di consumo/produzione della specie  $i$  [mol/s];

$\mathbf{N}_i$ : flusso della specie  $i$ ;

### 3.2.3 Bilanci di Energia

Per quanto riguarda i bilanci di energia abbiamo considerato un ingresso di energia dovuto dalla reazione di combustione, e poi dei scambi termici, tra cui quello con l’aria in ingresso ad una temperatura costante. In questo caso abbiamo considerato dei flussi di calore anche attraverso le sezioni “C1-C2-D”, in quanto la struttura in calcestruzzo parteciperà al bilancio sottraendo calore al sistema.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad \text{Equazione 3.9}$$

Dove:

$T$ : temperatura [K];

$\mathbf{u}$ : vettore delle velocità nelle tre dimensioni [m/s];

$\rho$ : densità [ $\text{kg/m}^3$ ];  
 $C_p$ : calore specifico della miscela dei gas [ $\text{J/KgK}$ ];  
 $k$ : conducibilità termica [ $\text{W/mK}$ ];  
 $Q$ : flusso di calore derivante dalla reazione [ $\text{J/s}$ ] (Equazione 2.3).

### 3.3 Determinazioni delle condizioni al contorno

In questo paragrafo verranno presentate le varie condizioni al contorno e iniziali ipotizzate per lo sviluppo delle equazioni precedentemente descritte.

#### 3.3.1 Bilanci di quantità di moto

Per quanto riguarda i bilanci di quantità di moto sono state adottate le seguenti cinque condizioni al contorno (BC) e una condizione iniziale (IC):

$$BC_A: v = v_{IN} \quad \text{Equazione 3.10}$$

$$BC_B: v = v_{OUT} \quad \text{Equazione 3.11}$$

$$BC_P: v = v_{GAS} \quad \text{Equazione 3.12}$$

$$BC_{C1} = BC_{C2} = BC_D: v = 0 \quad \text{Equazione 3.13}$$

$$IC: v = v_{IN} \quad \text{Equazione 3.14}$$

La velocità in ingresso nella sezione “A” è determinata a priori dalla velocità del vento, come la velocità dei gas di combustione attraverso la sezione “P”, la quale è determinata dalla stechiometria della sezione.

La velocità in uscita dalla sezione “B”, non può essere determinata a priori come per le altre due sezioni, ma nel linguaggio “COMSOL” viene definita come *outflow*, che considera un flusso convettivo in uscita.

Come condizione iniziale, consideriamo una velocità che lungo tutta la galleria pari alla velocità del vento in ingresso.

### 3.3.2 Bilanci di massa

Per quanto riguarda i bilanci di quantità di massa sono state adottate le seguenti cinque condizioni al contorno (BC) e una condizione iniziale (IC) per ogni specie in studio.

Per la sezione “A”, le condizioni al contorno sono:

$$c_{CO} = 0 \quad \text{Equazione 3.15}$$

$$c_{O_2} = c_{O_2,in} \quad \text{Equazione 3.16}$$

$$c_{CO_2} = 0 \quad \text{Equazione 3.17}$$

$$c_{H_2O} = 0 \quad \text{Equazione 3.18}$$

In questo ipotizziamo un ingresso di aria; la quale è composta dal 78% di Azoto, il 21 % di ossigeno e 1% di altri gas, trascurabili.

Per la sezione “B”, le condizioni al contorno per tutte e tre le specie in studio sono rappresentate come un flusso convettivo in uscita:

$$N_{CO,out} = \mathbf{v} \nabla c_{CO} \quad \text{Equazione 3.19}$$

$$N_{O_2,out} = \mathbf{v} \nabla c_{O_2} \quad \text{Equazione 3.20}$$

$$N_{CO_2,out} = \mathbf{v} \nabla c_{CO_2} \quad \text{Equazione 3.21}$$

$$N_{H_2O,out} = \mathbf{v} \nabla c_{H_2O} \quad \text{Equazione 3.22}$$

Dove il termine  $\mathbf{v}$  indica il vettore delle velocità espresso in m/s.

Queste condizioni al contorno, sono determinata sempre con la condizione al contorno “outflow”, disponibile nel *software* “COMSOL”.

Le condizioni al contorno per la sezione “P”, sono determinate come flusso in ingresso dei gas dei combustioni:

$$N_{CO} = N_{CO,in} \quad \text{Equazione 3.23}$$

$$N_{O_2} = N_{O_2,out} \quad \text{Equazione 3.24}$$

$$N_{CO_2} = N_{CO_2,in} \quad \text{Equazione 3.25}$$

$$N_{H_2O} = N_{H_2O,in} \quad \text{Equazione 3.26}$$

Per le sezioni “C1-C2-D”, essendo dei *walls* non abbiamo nessuno flusso di materia in uscita o in ingresso, quindi le condizioni al contorno impostate sono:

$$N_{CO} = 0 \quad \text{Equazione 3.27}$$

$$N_{O_2} = 0 \quad \text{Equazione 3.28}$$

$$N_{CO_2} = 0 \quad \text{Equazione 3.28}$$

$$N_{H_2O} = 0 \quad \text{Equazione 3.30}$$

Come condizioni iniziali (IC<sub>i</sub>) abbiamo impostato i seguenti valori, espressi in mol/L.

$$c_{CO} = 0 \quad \text{Equazione 3.31}$$

$$c_{CO_2} = 0 \quad \text{Equazione 3.32}$$

$$c_{O_2} = c_{O_2, \text{iniziale}} \quad \text{Equazione 3.33}$$

$$c_{H_2O} = 0 \quad \text{Equazione 3.34}$$

Queste condizioni iniziali sono state impostate considerando una concentrazione pari a zero dei due principali gas di combustione in quanto l’incendio di pozza deve ancora svilupparsi. Questo perché in una galleria priva di traffico stradale, si ipotizza che ci sia solo l’aria composta principalmente da ossigeno ed azoto.

Per quanto riguarda la condizione iniziale specifica per l’ossigeno, è stata ipotizzata una concentrazione molare di circa 7.83 mol/m<sup>3</sup>, corrispondente ad una concentrazione volumetrica del 20.9 %.

### 3.3.2 Bilanci di energia

Per quanto riguarda i bilanci di energia sono state adottate le seguenti cinque condizioni al contorno (BC) e una condizione iniziale (IC).

$$BC_A: T = T_{IN} \quad \text{Equazione 3.35}$$

$$BC_B: -k(\nabla T) = 0 \quad \text{Equazione 3.36}$$

$$BC_P: Q_{in} = Q_{reaction} \quad \text{Equazione 3.37}$$

$$BC_{C1} = BC_{C2} = BC_D: Q_{out} = h(T_{ext} - T) \quad \text{Equazione 3.38}$$

$$IC: T = T_{IN} \quad \text{Equazione 3.39}$$

La temperatura nella sezione “A” è determinata a priori, poiché essendoci un ingresso continuo di aria ad una temperatura di 305.15 K, è stata impostata questa come condizione al contorno

Nella sezione “B” abbiamo ipotizzato un flusso termico convettivo, quindi anche in questo caso abbiamo è stata impostata la condizione *outlet*.

Per le sezioni “C1-C2-D”, come precedentemente indicato, abbiamo dovuto considerare le pareti in calcestruzzo, le quali partecipano in modo significativo al bilancio dissipando calore. Questa dissipazione, come indicata nell’equazione 3.13, è proporzionale alla costante di conducibilità termica “*h*”, la quale per il calcestruzzo ha un valore di 1.75 W/mK e alla temperatura esterna “*T<sub>ext</sub>*” che assume il valore di 305.15 K.

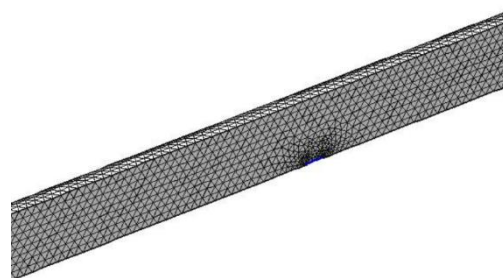
Come condizione iniziale abbiamo impostato una temperatura pari a  $T_{IN} = 305.15$  K.

### 3.4 Costruzione della Mesh

Utilizzato il metodo a volumi finiti per lo sviluppo dello studio, abbiamo dovuto suddividere il dominio di calcolo in più elementi, costruendo una *mesh*.

Per creare questa *mesh* abbiamo utilizzato la costruzione automatica fornita dal programma per lo studio di fenomeni fluidodinamici. Cercando di ridurre la grandezza dei prismi in prossimità della pozza di petrolio.

Nella figura 2.8 si può vedere una rappresentazione della *mesh* nella galleria tagliata lungo l’asse di simmetria





# CAPITOLO 4

## Dati sperimentali

Per poter validare i risultati che estrapoleremo da questo lavoro di tesi, ci serviranno dei dati raccolti sperimentalmente. Come confronto utilizzeremo quelli raccolti durante le prove sperimentali effettuate presso l'università di Genova nel 2008.

### 4.1 Prove Sperimentali

Le prove condotte sperimentalmente presso l'università di Genova avevano come scopo principale effettuare uno studio termico e chimico degli incendi di pozza che si sviluppano nelle gallerie stradali.

Come già detto nei capitoli precedenti, le prove sperimentali sono state condotte in un riproduzione in scala 1: 30 della galleria stradale "Brasile" situata nell'autostrada A7 Genoa – Milano, realizzata tramite cinque tubi in calcestruzzo disposti in serie e uniti con del sigillante siliconico, con le seguenti caratteristiche tecniche:

- canne in fibrocemento tipo "Europa", con spessore:
- componenti base utilizzati per la costruzione: fibre poliacrilonitrile, fibre poliviniliche, fibre al carbonio, silicati e cementi;
- rugosità media: 0.002m;
- resistenza termica:  $h=1.75 \text{ W/mK}$
- raggio interno 15 cm;
- spessore della tubazione: 2 cm

Come pavimentazione all'interno del tunnel in sostituzione dell'asfalto è stato utilizzato un pannello di lana di vetro, lungo 5 metri con uno spessore massimo di 9 cm al centro della galleria, perché il materiale originario parteciperebbe in modo attivo alla reazione di combustione.

Per facilità operative il contenitore in metallo su cui è stato disposto il combustibile, è stato posizionato su una slitta, la quale è legata a dei cavi in acciaio così da permettere il corretto posizionamento (figura 4.2)

Al fine di evitare alterazioni nei profili termici e di composizione a causa di una possibile conduzione di calore tra il contenitore in acciaio e la lana di vetro, è stata posizionata una slitta in materiale isolante.

Come già anticipato nel secondo capitolo noi faremo riferimento alla prova sperimentale n° 15 GEI, con un campione di gasolio bianco di 12 ml.



Figura 4.2: Foto della slitta utilizzata nelle prove sperimentali

Come punto di campionamento noi utilizzeremo la termocoppie e il analizzatore di fumi disposti nella sezione B punto 7ab.

Lo schema dettagliato con tutte la misure tecniche si trova nell'allegato 2.

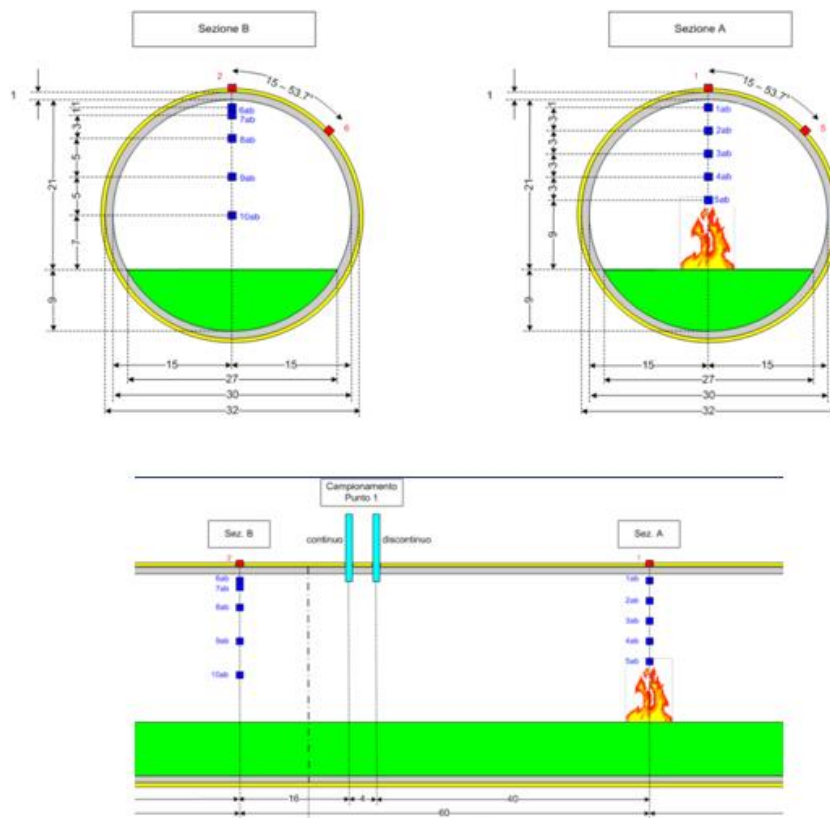


Figura 4.1: Schema galleria in scala

## 4.2 Profili termici

Per rilevare le temperature all'interno della tubazione durante gli incendi, sono state predisposte delle termocoppie, chrome-alumeldi, lungo tutta la galleria (figura 4.3), che lavoravano un intervallo di campionamento di 5 secondi

La termocoppia e il campionatore dei fumi sono stati posizionati all'interno della galleria in prossimità della volta (punto 7ab – Figura 4.1), ad una distanza di 0.4 m a valle della pozza in miniatura.

Come si può vedere nella figura 4.3, nelle due estremità sono state predisposte due cappe di aspirazione, con l'unico scopo di aspirare i fumi tossici che si liberavano durante le prove. Queste cappe però non andavano in alcun modo ad influenzare il moto fluidodinamico all'interno della galleria, infatti provando a misurare con un anemometro la velocità dell'aria all'ingresso delle tubazioni è stato registrato un valore di 0.5 m/s.

Questo valore però rappresenta la sensibilità minima dello strumento, quindi si è ipotizzato una velocità effettiva minore o uguale a 0.5 m/s.

Questo parametro è molto importante in quanto nelle simulazioni, in seguito espone rappresenterà un'incognita del nostro studio.



Figura 4.3: Sistema di termocoppie per il prelievo dei dati termici

Graficando i dati campionati durante tutta la reazione di combustione si è ottenuto il grafico riportato in figura 4.4.

Come si può vedere nel grafico, al momento dell'inesco la temperatura rilevata è quella ambientale, circa 32°C, in quanto le prove sperimentali sono state condotte nel mese di luglio, durante un periodo molto caldo.

La temperatura, una volta che l'incendio si è sviluppato, aumenta linearmente fino ad un massimo di 74 °C, per poi diminuire in quanto ci avviciniamo al termine della reazione.

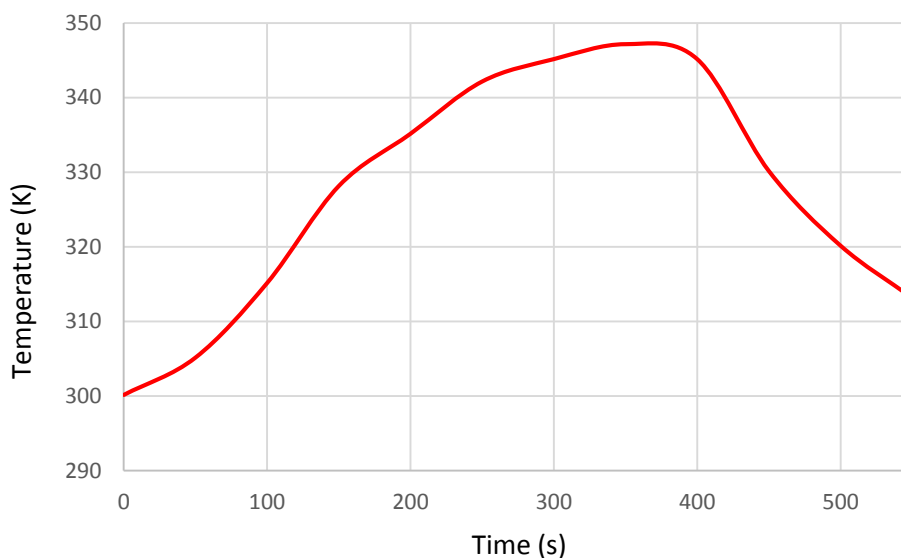


Figura 4.4: Profilo della temperatura nel punto 7ab all'interno della galleria in scala 1:30

Nelle conclusioni riportate a seguito delle prove sperimentali è stato esposto come il calcestruzzo che costituisce la parte superiore della galleria partecipi in modo attivo ai bilanci termici sottraendo calore, infatti il punto più caldo non è stato rilevato vicino alla volta, ma leggermente più basso dove il contributo di raffreddamento della struttura in cemento non si fa più sentire.

### 4.3 Profili di concentrazione

Lo studio dei profili dei principali componenti dei gas di combustione e dell'ossigeno all'interno della galleria, è stato eseguito per poter capire come si evolvesse la composizione dell'aria all'interno di un ambiente confinato a seguito di un incendio di pozza.

Durante le prove sperimentali condotte a Genova sono stati effettuati più prove in diverse condizioni operative e strutturali, ma come per il caso della temperatura non ci baseremo sulla prova n°15 GEI, con la combustione di gasolio lampante.

Durante queste prove sono stati prelevati campioni d'aria e determinati i valori del monossido di carbonio e dell'ossigeno, trascurando quelli dell'anidride carbonica e del vapore acqueo. Questa scelta si basa sul fatto che i due componenti analizzati riportano problemi alle vie respiratorie anche a piccole variazioni rispetto alla loro concentrazione in condizioni atmosferiche normali.

I campionatori di fumi utilizzati sono stati posizionati nella sezione B punto 7ab (vedi allegato 2), e non sopra la fiamma, perché si sarebbero registrati dei problemi a causa delle temperature elevate che si sarebbero presentate sopra la pozza.

Il campionamento è stato fatto in modo attivo, ogni 15 secondi attraverso delle pompe che aspiravano dei volumi costanti di aria e li facevano passare attraverso dei sistemi adsorbenti che permettevano un'analisi chimica sequenziale.

### 4.3.1 Profili del monossido di carbonio

Con i valori del monossido di carbonio è stato costruito il grafico riportato in figura 4.5

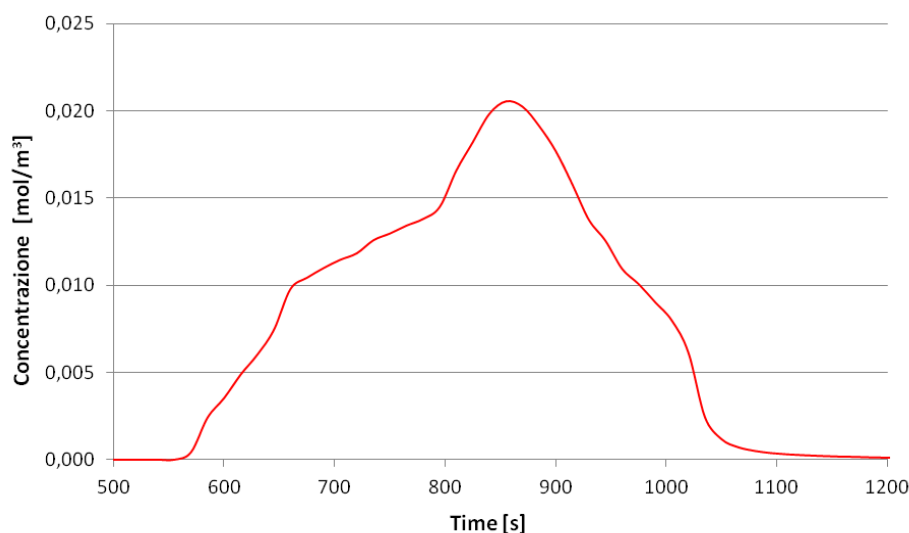


Figura 4.5: Profilo della monossido di carbonio nel punto 7ab all'interno della galleria in scala 1:30

Come si può vedere dal grafico, la concentrazione di monossido comincia ad aumentare subito dopo l'innesco dell'incendio ( $t=540$  s) fino ad un massimo del  $0,0021 \text{ mol/m}^3$  corrispondente a 500 ppm.

La tabella 4.1, sono riportati i principali effetti del CO nell'uomo.

Tabella 4.1: effetti del monossido di carbonio nell'uomo

ppm CO	effetti sull'uomo
0	nessun effetto
25	TLV-TWA
200	nausea, vertigini, fatica
300	TLV-STEL
400	convulsioni, incoscienza, morte con 3-4 ore di esposizione
800	convulsioni, incoscienza, morte con 2-3 ore di esposizione
6400	convulsioni, incoscienza, morte con 30 minuti di esposizione
12800	convulsioni, incoscienza, morte con 1-3 minuti di esposizione

TLV-TWA = valore massimo consentito per un'esposizione prolungata ( 8 ore al giorno e/o 40 ore alla settimana)

TLV-STEL = è il valore massimo consentito per esposizioni brevi - non oltre 15 minuti - ed occasionali - non oltre quattro esposizioni nelle 24 ore, intervallate almeno ad un'ora di distanza l'una dall'altra

Come si può vedere dal grafico, dopo un paio di minuti dall'inizio dell' incendio la concentrazione raggiunge la soglia di  $0.0098 \text{ mol/m}^3$ , equivalenti a 200 ppm. Questo valore normalmente è considerato superiore al valore di soglia per le gallerie stradali, fissato ai 150 ppm. È stato fissato questo valore, poiché gli effetti che riporta sulle persone non sono mortali per brevi periodi di esposizioni, ma possono alterare le condizioni psicofisiche, tali da compromettere il comportaemto delle persone durante l'evacuazione di una galleria stradale.

Dopo circa tre minuti, il valore di monossido di carbonio rilevato supera le  $0.013 \text{ mol/m}^3$ , corrispondente al valore di TVL-STEL, riportato nella tabella 4.1. Questo limite è il valore massimo consentito per esposizioni brevi (non oltre i 15 minuti) ed occasionali, per un massimo di quattro esposizioni nelle 24 ore intervallate ad almeno un'ora di distanza l'una dall'altra. Come valore temporale massimo di esposizione è stato scelto quello dei 15 minuti, in quanto dopo un incidente, oltre al personale di soccorso che può restare esposto a concentrazioni di sostanze tossiche molte più elevate dei limiti TVL-STEL, grazie ai respiratori, per i conducenti delle vetture è stato stimato un tempo sufficiente per evacuare un galleria attorno ai 15 minuti.

È da sottolineare che dai dati sperimentali si nota che in prossimità dell'incendio, si raggiungono valori molto più elevati rispetto ai 300 ppm precedentemente fissati e quindi bisogna considerare sistemi di ventilazione e/o sistemi che permettano un'evacuazione in un tempo più breve possibile e quindi inferiori ai 15 minuti precedentemente impostati.

### ***4.3.2 Profili dell'ossigeno***

Come per il monossido di carbonio, sono state analizzate anche le concentrazioni di ossigeno ad intervalli prestabiliti. I valori riscontrati sono stati poi riportati nel grafico presente nella figura 4.6:

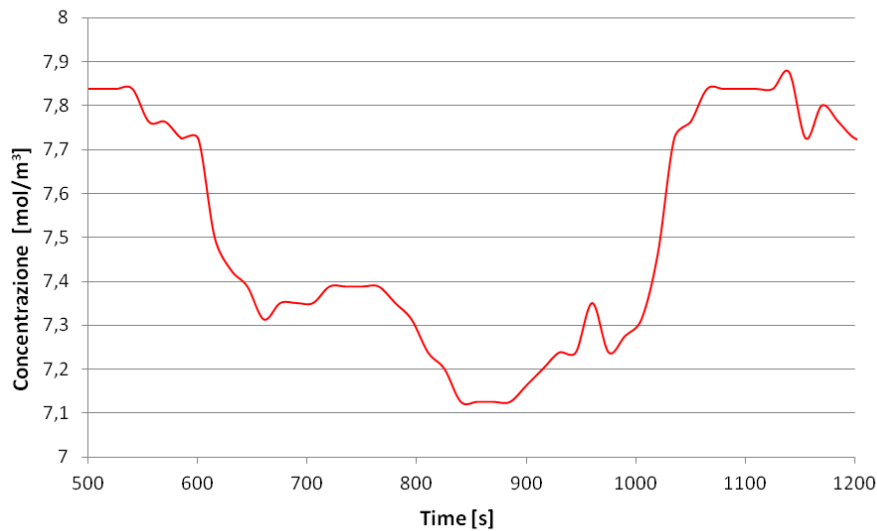


Figura 4.6: Profilo dell'ossigeno nel punto 7ab all'interno della galleria in scala 1:30

Il bilancio totale dell'ossigeno a differenza di quello del CO è determinato dalla combustione, che determina un consumo della specie e da un ingresso derivante dal flusso di aria che entra in galleria. Questi due flussi possono spiegare il profilo molto più disturbato rispetto a quello del monossido.

Dal grafico riportato nella figura 4.6 si evidenzia un valore di partenza dell'ossigeno pari a  $7.83 \text{ mol/m}^3$ , corrispondenti ad una concentrazione del 20.9 % in condizioni normali, la quale subito dopo l'innesco ( $t=540 \text{ s}$ ) scende fino ad un valore minimo del  $7.12 \text{ mol/m}^3$ .

Qui di seguito, nella tabella 4.2 sono riportati i principali effetti dell'ossigeno a varie concentrazioni:

Tabella 4.2: effetti della sotto-ossigenazione nell'uomo

% O <sub>2</sub>	effetti sull'uomo
21	nessuno
18-21	difficoltà respiratorie
< 18	atmosfera non respirabile: problemi respiratori
< 12	svenimento, morte

Dai dati sperimentali si nota che dopo circa un minuto e mezzo e per tutta la durata dell'esperimento il valore dell'ossigeno in atmosfera rimane compreso tra le  $7.8$  e le  $7.1 \text{ mol/m}^3$ , corrispondenti a delle concentrazioni volumetriche del 21% e del 18%.

In questo intervallo una persona normale in buona salute non è in pericolo di vita a causa della sotto-ossigenazione, ma riscontra solo delle difficoltà respiratorie.

Bisogna però ricordare che queste difficoltà respiratorie dovute alla carenza di ossigeno nel sangue sono da sommarsi alle tutte le problematiche dei gas tossici che si liberano durante una combustione, come il monossido, precedentemente descritto.

## 4.4 Incendio con un combustibile più complesso

La composizione dei fumi derivanti dalla combustione di un'automobile sarebbe ancora più complessa di quella rilevata nel caso di un incendio di pozza con un solo combustibile, il gasolio bianco.

La tipologia dei prodotti derivanti dalla combustione dipenderebbe dalla composizione dei reagenti utilizzati, che per quanto riguarda il prototipo di automobile utilizzato nelle prove sperimentali, come si può vedere nella tabella 4.3, è costituito principalmente da una miscela di diversi materiali con caratteristiche merceologiche differenti contenenti un'ampia frazione di vari composti polimerici.

Tabella 4.3: Composizione e peso del prototipo d'auto, ottenuta da analisi statistiche di composizione percentuale di un veicolo in scala 1:1

Component classification	Material	Weight [g]	
Metal	Steel	28.41	
	Aluminium	4.48	
Glass		1.78	
Paint, soundproofing	Texiles	1.78	
Elastomers	Tyres	2.62	
Rigid plastic	Polypropylene (PP)	Eppendorf	1.15
		Polypropylene glass fibre	0.58
	Polyurethane	Polypropylene homo	0.58
		Polyurethane (car seat)	0.92
	Polyethylene	Low density	0.33
		Polyethylene (LDPE)	0.33
	Polyvinyl chloride	Hight density	0.33
		Polyethylene (HDPE)	0.46
	Polyamide	Polyvinyl chloride granular (PVC)	0.21
		Polyamide 12	0.21
	Styrolic	Polyamide 66	0.15
		Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	0.15
	Poly-methyl methacrylate	Polystyrene (PS)	0.13
		Thermoplastic Ployester	Pholyethylene terephthalate (PET)
Fuel	Polycarbonate (PC)	0.07	
	Kerosene		1.48
	Total	45.93	

La complessità della combustione di questa miscela di materiali è evidenziata dall'estrema varietà di prodotti da essa generati come riportato in Tabella 4.4.



Tabella:4.4: Qualitative (relative presence expressed as concentration rank) and quantitative [mg m<sup>-3</sup>] chemical analysis of combustion compounds during a prototype car fire test in laboratory tunnel

Tenax adsorber	Concentration rank	Xad-2 adsorber	[mg/m <sup>3</sup> ]
Benzene	1		
Pentane, 2-methyl-	2	Naphthalene	0,607
Toluene	3	Acenaphthylene	0,136
Hexane	4		
Pentane	5		
Butane, 2,2,3,3-tetramethyl-	6	Silica gel adsorber	[µg/m <sup>3</sup> ]
2-Pentene, (E)-	7		
Butane, 2-methyl-	8	HF	0,087
Hexane, 3-methyl-	9	HCl	0,165
1-Butene-3-yne, 2-methyl-	10	HNO <sub>3</sub>	0,707
Pentane, 3-methyl-	11	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,790
1,2-Butadiene, 3-methyl-	12		
Hexane, 3,3-dimethyl-	13		
2-Pentene, 3-methyl-, (E)-	14	PTFE glass fiber filter	[mg/m <sup>3</sup> ]
Propane, 2-cyclopropyl-	16		
Pentane, 2,3,4-trimethyl-	17	Anthracene	0,576
Decane	18	Fenanthrene	0,587
Heptane	19	Fluoranthene	0,536
2-Pentene, 3-methyl-, (E)-	20	Pyrene	0,437
	[mg/m <sup>3</sup> ]	Benzo[a]anthracene	0,172
Benzene	0,415	Crisene	0,191
Toluene	0,380	Benzo[a]pyrene	0,128
Ethyl benzene	0,015	Benzo[b]fluoranthene	0,169
p-xilene	0,056	Benzo[k]fluoranthene	0,136
m-xilene	0,053	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0,114
o-xilene	0,027	Benzo[g,h,i]perylene	0,095



# CAPITOLO 5

## Risultati ottenuti

In questo capitolo verranno esposti i principali risultati ottenuti nelle simulazioni descritte precedentemente, in particolare i profili termici, campi di moto ed i profili di concentrazione ottenuti applicando i due schemi cinetici. Per i diversi casi trattati si è analizzato come i risultati vengano influenzati con la variazione della velocità del vento in ingresso.

Come già evidenziato nel capitolo quattro, l'unico vincolo imposto alla velocità del vento è fissato ad un valore massimo di 0.5 m/s, quindi una volta ipotizzato lo schema cinetico l'unico grado di libertà che dobbiamo saturare è la velocità del flusso d'aria all'ingresso. In questo studio prenderemo a riferimento i seguenti valori di velocità:

- 0.01 m/s;
- 0.1 m/s;
- 0.5 m/s.

In tutte le simulazioni effettuate, per rendere il più accurato possibile il modello, i bilanci di massa e di quantità di moto sono stati risolti simultaneamente ai bilanci energetici, così da considerare la dipendenza della temperatura in tutte le proprietà utilizzate.

Come accennato nel capitolo 2, le due principali incognite riscontrate nella simulazioni dei profili massivi sono state l'effettiva composizione del reagente e la cinetica di reazione con il quale avviene la combustione.

Per risolvere questi problemi abbiamo introdotto come ipotesi semplificativa l'uso di un unico reagente, il dodecano, e due schemi cinetici riportati nel libro "*Combustion*", di Glassman I. e di R. A. Yetter, i quali considerano come unici prodotti il monossido di carbonio, l'anidride carbonio e il vapore acqueo.

Tali ipotesi sono fortemente semplificative, tuttavia questa soluzione oltre ad saturare i gradi di libertà del sistema, ci permette di ridurre al minimo gli sforzi di calcolo richiesti dal modello.

Per motivi di esposizione, i risultati dei vari bilanci verranno esposti in paragrafi differenti.

## 5.1. Schema cinetico numero 1

La reazione evidenziata nell'equazione 5.1:



considera la combustione 12 ml di gasolio bianco, da noi approssimato come  $C_{12}H_{23}$ , il quale reagisce con l'ossigeno presente nell'aria in ingresso nella galleria per sviluppare monossido di carbonio e di anidride carbonica in composizione equi-molare in aggiunta al vapore acqueo.

In tutti i casi risolti il consumo di ossigeno e il flusso in entrata dei gas di combustione viene calcolato considerando un ingresso di combustibile che rispecchi la funzione che descrive la portata di gasolio evaporato dalla pozza in determinate condizioni ambientali, infatti i flussi in uscita e in ingresso che si sviluppano in prossimità della pozza di gasolio, sono influenzati dal moto dell'aria che entra nel tunnel, in quanto questa va a variare la costante di *mass transfert* utilizzata nello script e il profilo di temperatura.

Per una più facile compressione della dinamica che sviluppa all'interno della galleria al variare della velocità del vento, esporremo i fotogrammi dei principali momenti della combustione.

### 5.1. Simulazione con velocità del vento pari a 0,01 m/s

Per eseguire questa simulazione sono state modificate le condizioni al contorno dei bilanci di moto in ingresso, impostando la velocità dell'aria a un valore pari a 0,01 m/s e determinate le portate dei gas in gioco tramite lo script in *Matlab*.

Una volta completato il procedimento iterativo sono stati raccolti i fotogrammi che rappresentano la variazione dei campi di moto all'interno della galleria e raggruppati in una sequenza di immagini rappresentate nelle figure 5.1-5.10.

Nelle prime tre figure (5.1-5.3) sono rappresentati i profili di velocità durante la prima fase della combustione, cioè quando la fiamma non ha raggiunto una situazione stazionaria rappresentata da un ingresso costante di gas di combustione. In questa fase i flussi in ingresso aumentano repentinamente incrementando le zone ad alta turbolenza. Nelle figure successive (5.4-5.7) è rappresentata la fase stazionaria, cioè un intervallo temporale in cui la velocità dei gas in ingresso è pressoché costante ad un valore di circa 0.07/0.08 m/s in prossimità della pozza per poi diminuire di intensità a valle dell'incendio. Dalla figura 5.8 alla 5.10 sono rappresentati gli istanti successivi allo spegnimento della fiamma, dove il sistema ritorna lentamente alle condizioni precedenti all'incendio.

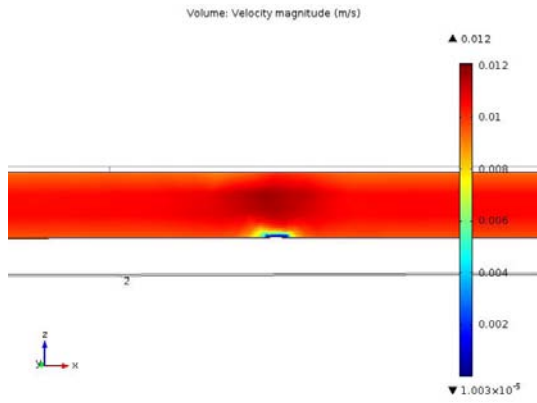


Figura 5.2: Campi di moto a 5 s - Vento 0.01 m/s

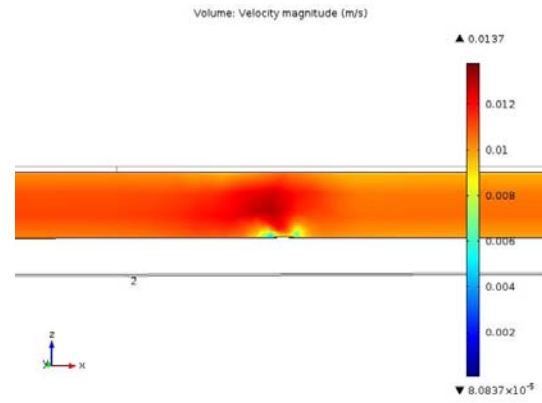


Figura 5.3: Campi di moto a 15 s - Vento 0.01 m/s

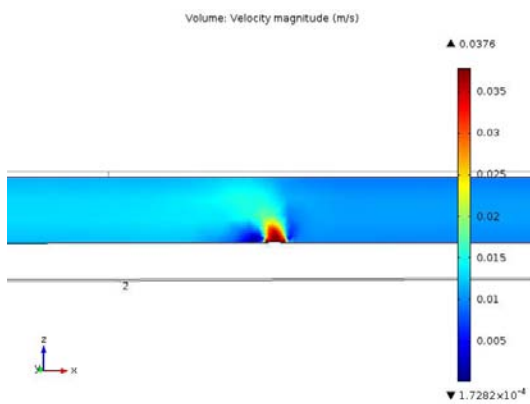


Figura 5.4: Campi di moto a 30 s - Vento 0.01 m/s

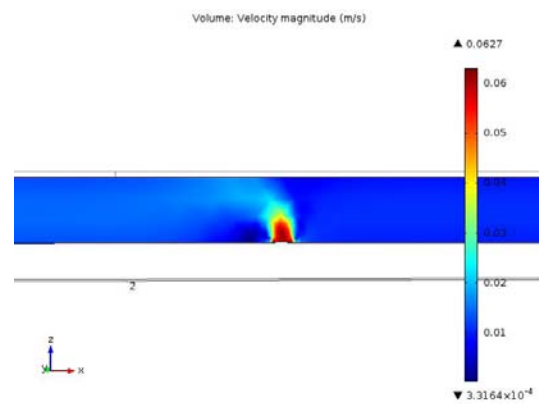


Figura 5.5: Campi di moto a 45 s - Vento 0.01 m/s

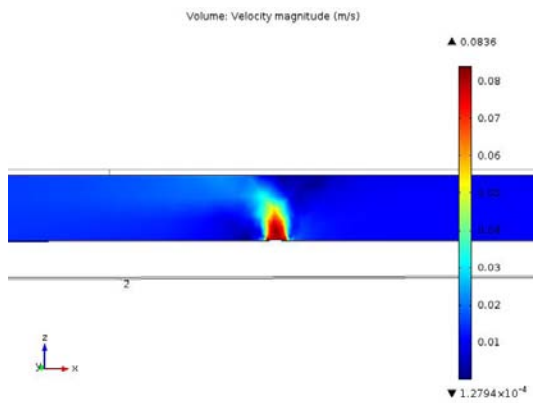


Figura 5.6 Campi di moto a 70 s - Vento 0.01 m/s

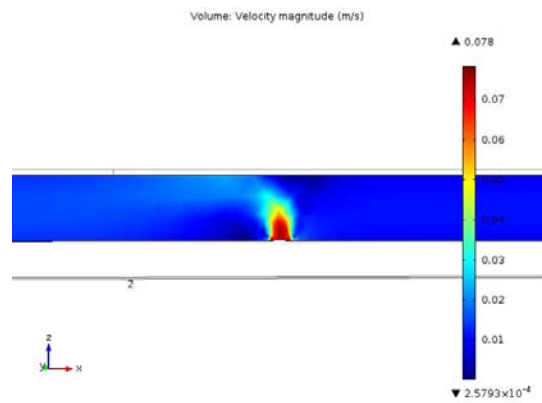


Figura 5.7: Campi di moto a 125 s - Vento 0.01 m/s

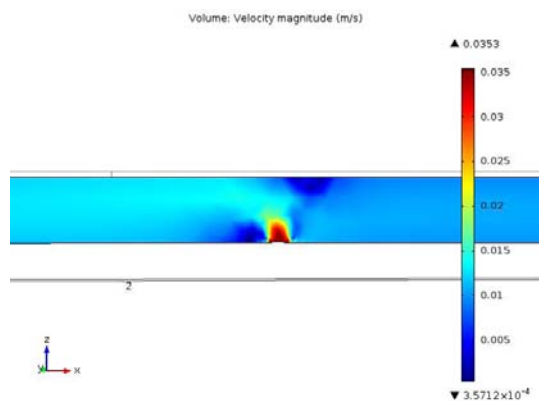


Figura 5.8: Campi di moto a 500 s - Vento 0.01 m/s

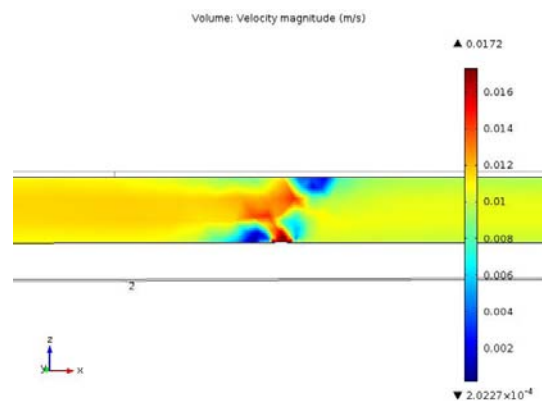


Figura 5.9: Campi di moto a 515 s - Vento 0.01 m/s

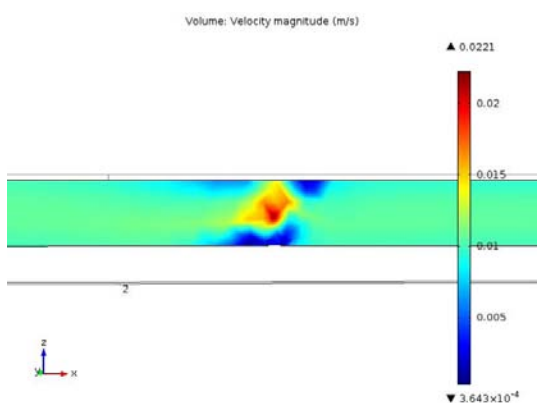


Figura 5.10: Campi di moto a 530 s - Vento 0.01 m/s

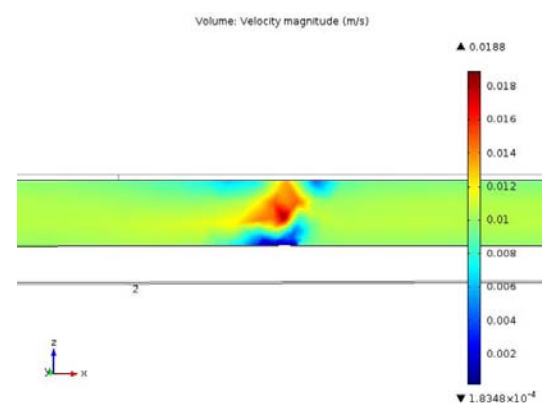


Figura 5.11: Campi di moto a 545 s - Vento 0.01 m/s

Un aspetto molto importante durante un incendio, come già spiegato nel primo capitolo è l'incremento di temperatura, dato che un ambiente risulta pericoloso per la salute umana se viene raggiunta la temperatura di 60°C.

Per valutare questo parametro, come per lo studio della quantità di moto, sono stati estratti i fotogrammi che rappresentano la variazione della temperatura all'interno della galleria in prossimità della pozza. Il mutamento dei profili termici è rappresentato nelle figure 5.11-5.20.

Come già detto in precedenza il valore iniziale di temperatura è stato impostato a 305 K, leggermente più alto della temperatura ambiente di 298 K poiché le prove sperimentali sono state condotte un caldo pomeriggio d'estate.

Nella figura 5.11, rappresentativa dell'istante temporale a 5 secondi dall'innesco, si nota che la temperatura è costante in tutta la galleria al valore di 305 K, tranne in un sottile film appena sopra la superficie del gasolio.

Nelle figure 5.12-5.13 si nota una zona con una temperatura di circa 560-590 K sopra la pozza ed a valle, che però non interessa il volume d'aria in prossimità della volta che rimane ad una temperatura prossima a quella iniziale. In queste due immagini si nota che il flusso di gas caldi si sposta a sinistra a causa dell'interazione con l'aria che entra da destra.

Una situazione stazionaria per quanto riguarda i profili termici viene raggiunta solamente dopo 45 secondi, dove si evidenzia un flusso di gas caldi che sale sopra la pozza di combustibile fino a scaldare il volume d'aria prossima alla volta della galleria. Questi gas caldi vengono poi dispersi a valle dell'incendio distribuendosi in tutto il volume della galleria. Lo spegnimento della fiamma è stato prefissato dopo 508 secondi dall'ignizione, infatti le figure 5.18-5.20 rappresentano gli istanti successivi all'incendio.

Nella figura 5.18 si nota che una volta cessata l'immissione dei gas di combustione caldi, si crea un cuscinetto costituito da una miscela di gas in prossimità dell'arco superiore della galleria che permane per poche decine di secondi.

Questo cuscinetto, come si nota nelle ultime due figure (5.19-5.20), grazie all'influenza di aria che entra a temperatura ambiente tende a diminuire la sua temperatura e contemporaneamente a traslare verso sinistra.

Dopo circa 545 secondi dall'inizio della reazione, si nota che in prossimità del punto di cui è stata posizionata la termocoppia siamo tornati alle condizioni termiche iniziali.

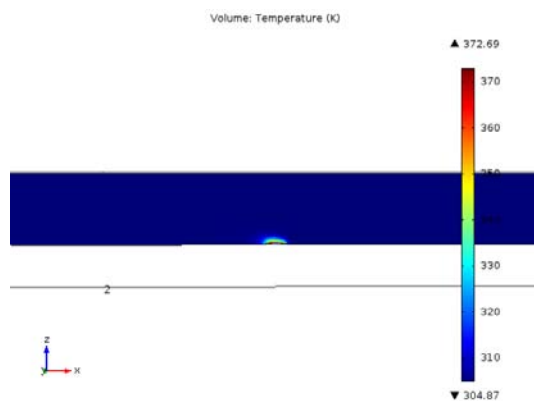


Figura 5.12: Temperatura a 5 s - Vento 0.01 m/s

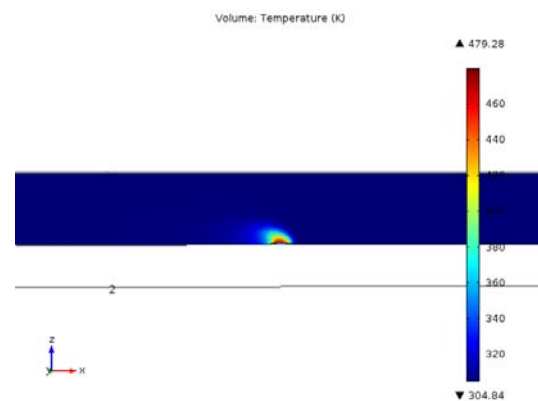


Figura 5.13: Temperatura a 15 s - Vento 0.01 m/s

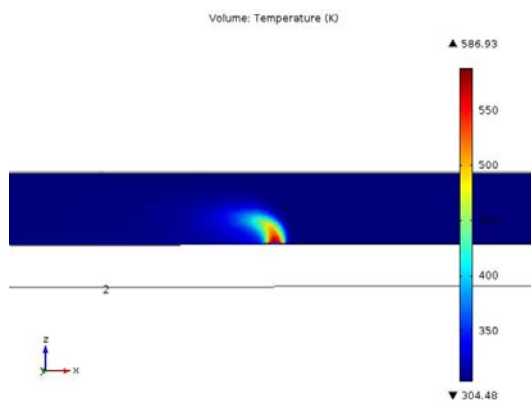


Figura 5.14: Temperatura a 30 s - Vento 0.01 m/s

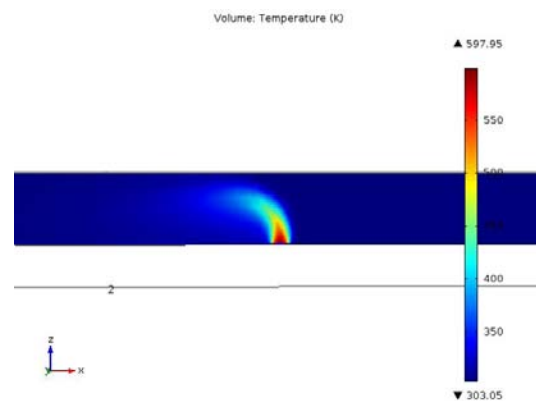


Figura 5.15: Temperatura a 45 s - Vento 0.01 m/s

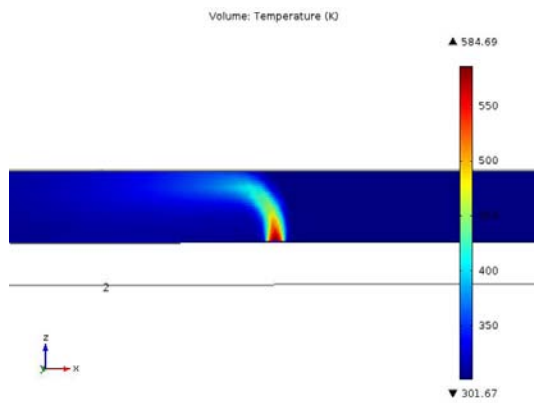


Figura 5.16: Temperatura a 70 s - Vento 0.01 m/s

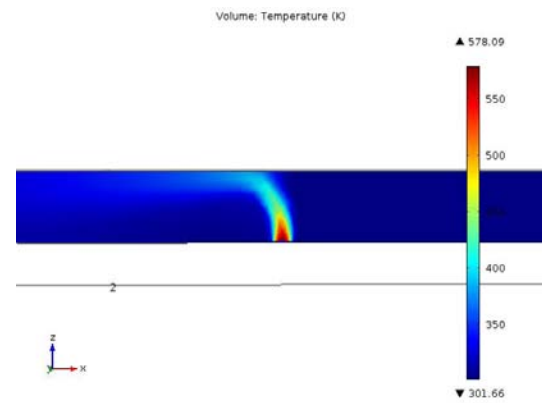


Figura 5.17: Temperatura a 125 s - Vento 0.01 m/s

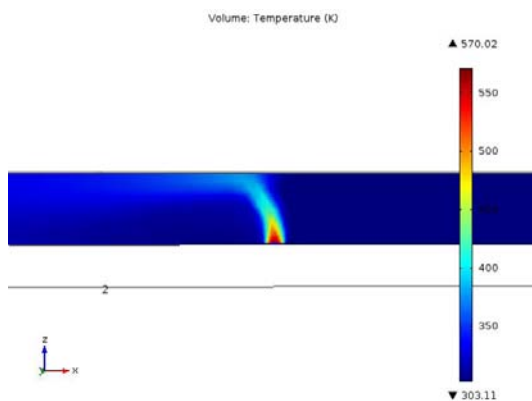


Figura 5.18: Temperatura a 500 s - Vento 0.01 m/s

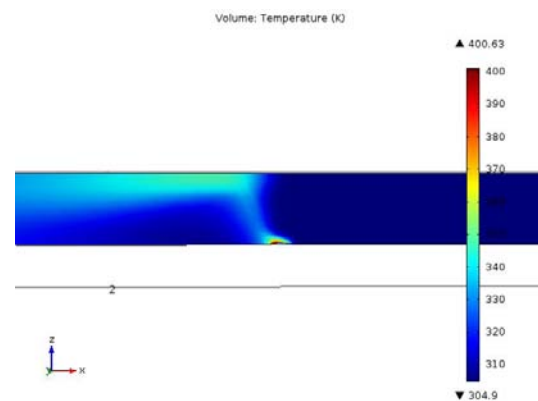


Figura 5.19: Temperatura a 515 s - Vento 0.01 m/s

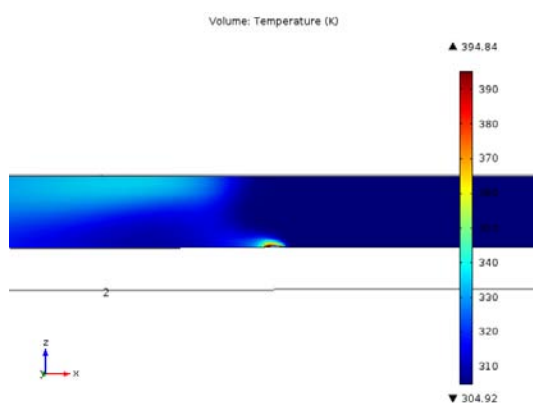


Figura 5.20: Temperatura a 530 s - Vento 0.01 m/s

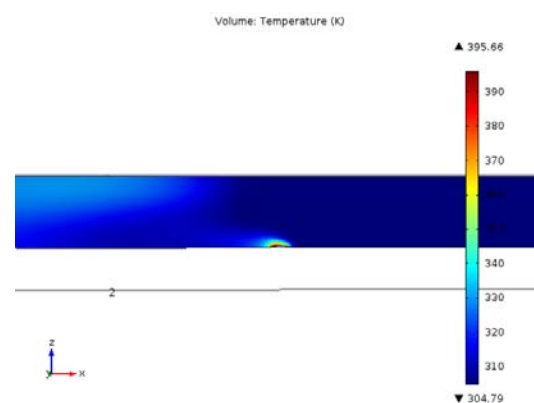


Figura 5.2: Temperatura a 545 s - Vento 0.01 m/s

Per aver un buon confronto con il profilo termico ricavato dai dati sperimentali, è stato costruito un grafico con le temperature rilevate nel punto geometrico situato nelle stesse coordinate spaziali in cui era posizionata la termocoppia (punto 7ab). Questo grafico è riportato in figura 5.21.



Come è stato anticipato nella descrizione dei fotogrammi, anche nel grafico si può notare che nei primi 30/40 secondi la parte superiore della galleria (punto 7ab) non è influenzata dalla presenza dei gas caldi, dato che non è stata registrata nessuna variazioni rispetto alle condizioni iniziali.

Dopo questo intervallo iniziale la temperatura aumenta repentinamente fino a raggiungere il valore di 347,5 K per poi diminuire nuovamente a causa della bassa temperatura presente al di fuori della galleria che crea un flusso di calore negativo.

Lo spessore della parete, di circa 2 cm, non è in grado di sottrarre a lungo tutto calore trasportato dai gas, infatti dopo circa 150 secondi abbiamo un secondo aumento della temperatura fino a raggiungere un equilibrio individuato attorno ai 347,5 K. Questa situazione di equilibrio termico viene mantenuta fino all'interruzione del flusso di gas in ingresso dovuto all'estinzione dell'incendio di pozza. Dopo circa 500 secondi dall'inizio della reazione, si verifica una diminuzione della temperatura, fino a raggiungere le condizioni iniziali di 305K:

Questo grafico mostra un andamento del tutto diverso rispetto a quello reale, benché i valori di temperatura raggiunti sono quasi identici a quelli rilevati sperimentalmente.

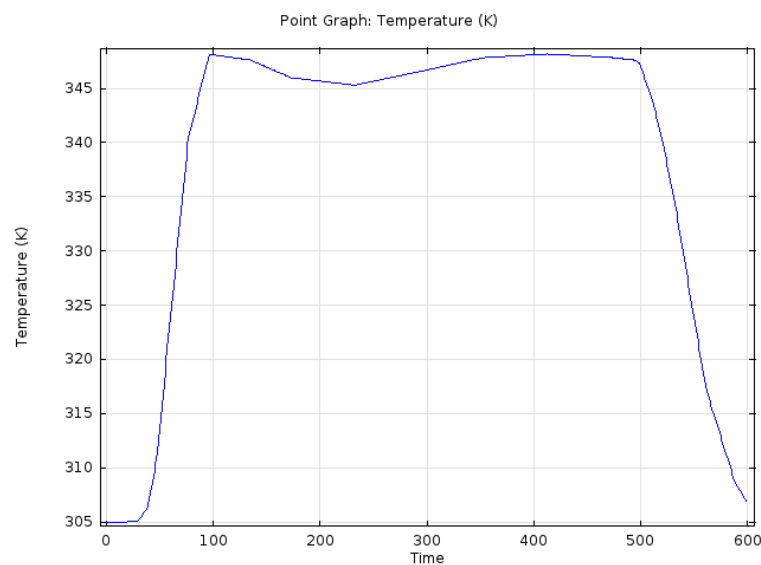


Figura 5.21: Temperatura (K) rilevata nel punto 7ab rispetto al tempo (secondi)

Nel stessa posizione della termocoppia sono stati prelevati i campioni d'aria per analizzare le concentrazioni dell'ossigeno e del monossido di carbonio.

Con i dati raccolti sono stati costruiti dei grafici (figure 5.22-5.23) che rappresentano la concentrazione, espressa in moli/m<sup>3</sup> contro il tempo.

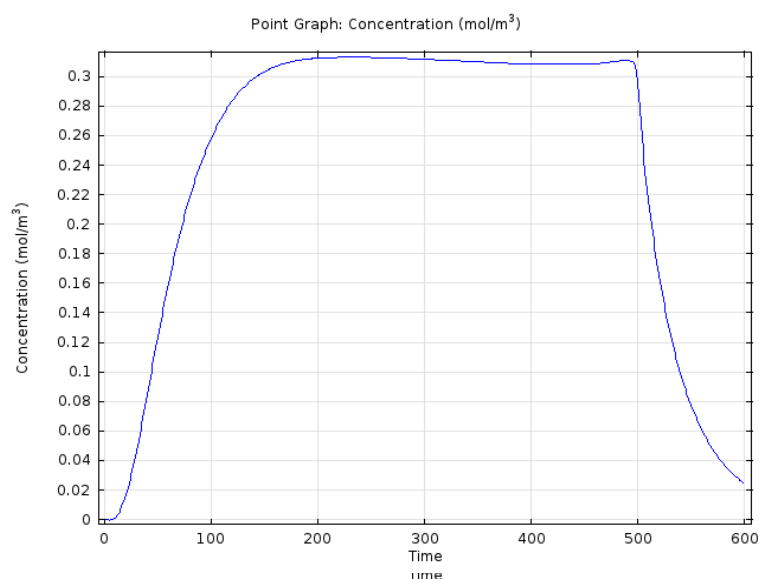


Figura 5.22: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi)

Nella figura 5.22 è rappresentata la variazione della concentrazione del CO nella zona di campionamento. Come si vede all'inizio la concentrazione molare è pari a zero, ma subito dopo 200 secondi dall'inizio della prova raggiungiamo il valore massimo che corrisponde a 0.32 moli/m<sup>3</sup>. Il profilo dell'ossigeno rappresentato nella figura 5.23 raggiunge la concentrazione di circa 7.52 moli/m<sup>3</sup> dopo circa 200 secondi e rimane costante fino al momento di spegnimento della fiamma. Dopo l'interruzione della reazione sia il monossido sia l'ossigeno tornano alla concentrazione di partenza in circa 100 secondi.

### 5.1.2 Simulazione con velocità del vento pari a 0,1 m/s

Anche in questo caso abbiamo utilizzato le condizioni al contorno esposte nel terzo capitolo impostando la velocità del vento in ingresso ad un valore pari a 0,1 m/s. Come per il caso precedente è stata rappresentata la variazione dei campi di moto attraverso i principali fotogrammi (figure 5.24-5.33).

In questa simulazione avendo una velocità del vento dieci volte superiore rispetto al caso appena discusso il flusso d'aria predomina sui gas in ingresso dalla pozza determinando quindi i profili di quantità di moto.

Come si può vedere nelle figure 5.24- 5.25, il flusso di gas in ingresso è troppo basso per influenzare i campi di moto create per lo più dal vento ingresso, infatti le uniche turbolenze che si evidenziano in prossimità della pozza sono considerate una conseguenza dell'iterazione del flusso d'aria con le pareti della pozza.

Le turbolenze derivanti dall'interazioni tra i due flussi si cominciano a intravedere nella figura 5.26 invece dalla figura 5.27 alla 5.30 i gas di combustione assumono la massima

velocità modificando i profili di velocità dell'aria in ingresso solo in una zona circoscritta alla pozza di combustibile.

Anche a valle dell'incendio le turbolenze si protraggono solo vicino al suolo e per non più di un metro dalla pozza. Dalla figura 5.31 non è più presente un ingresso di gas derivanti dall'incendio e quindi i profili di quantità di moto all'interno del tunnel sono di nuovo dominati unicamente dal flusso d'aria in ingresso

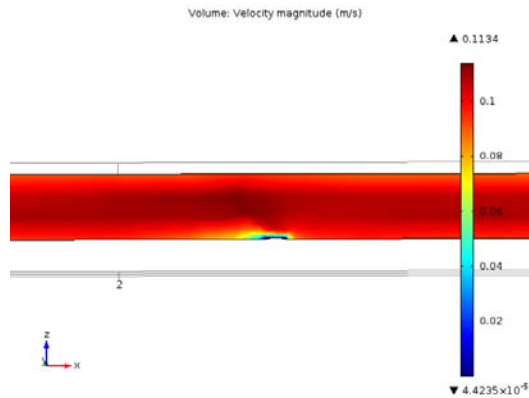


Figura 5.2421: Campi di moto a 5 s - Vento 0.1 m/s

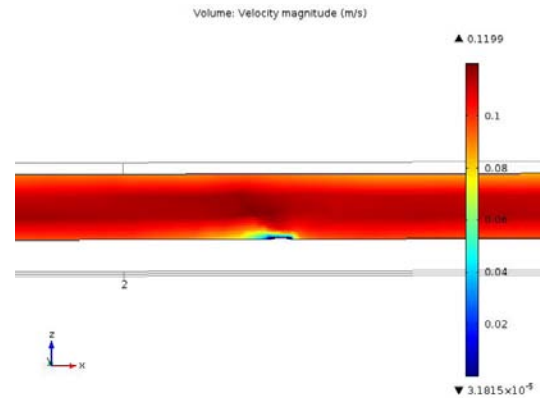


Figura 5.2522: Campi di moto a 15 s - Vento 0.1 m/s

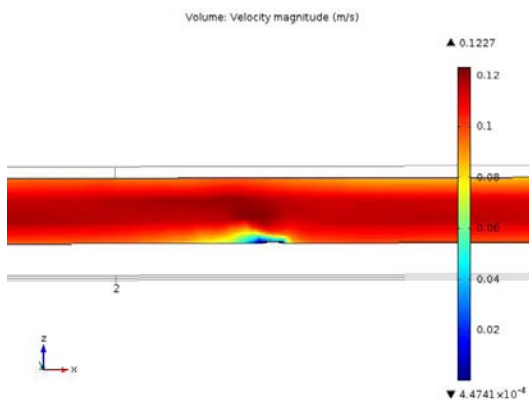


Figura 5.26: Campi di moto a 30 s - Vento 0.1 m/s

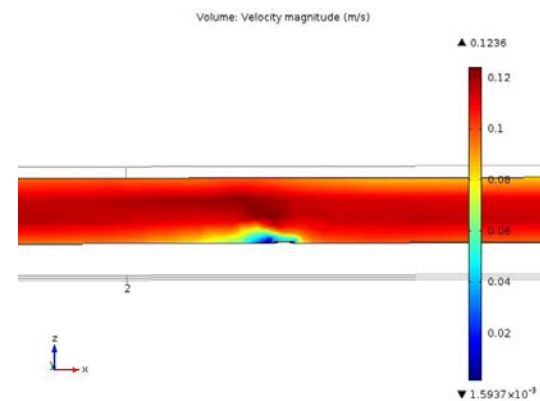


Figura 5.27: Campi di moto a 45 s - Vento 0.1 m/s

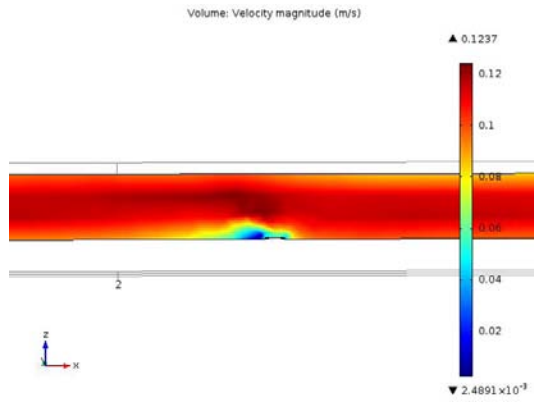


Figura 5.28: Campi di moto a 70 s - Vento 0.1 m/s

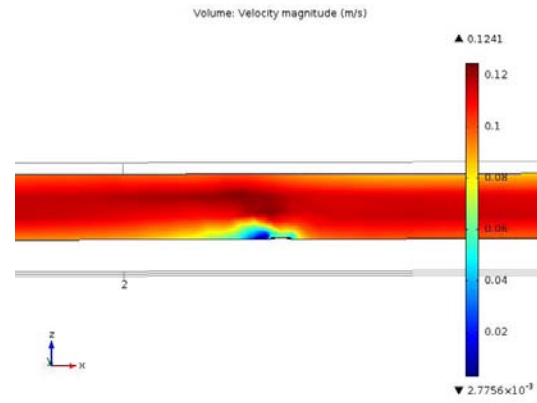


Figura 5.29: Campi di moto a 125 s - Vento 0.1 m/s

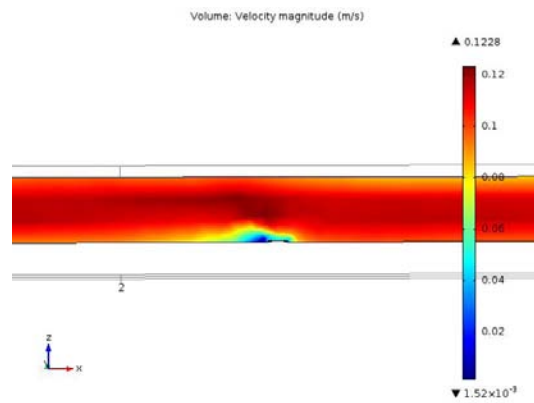


Figura 5.30: Campi di moto a 500 s - Vento 0.1 m/s

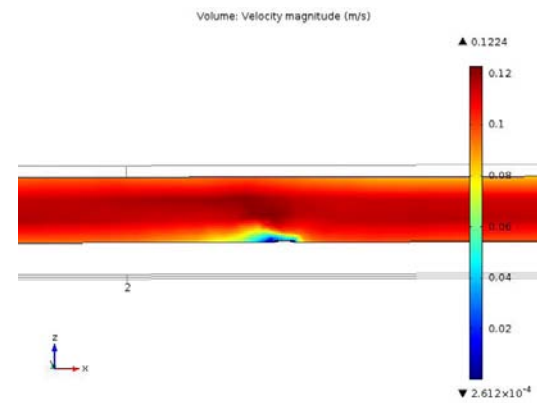


Figura 5.31: Campi di moto a 515 s - Vento 0.1 m/s

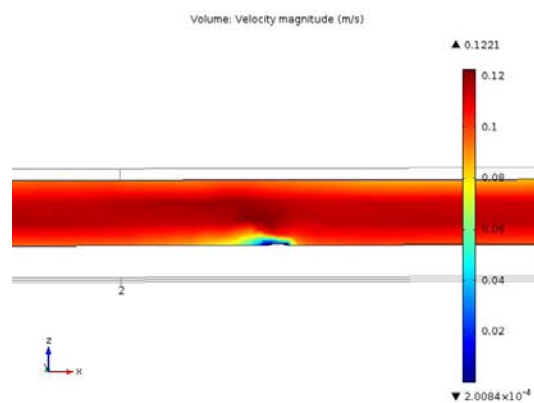


Figura 5.32: Campi di moto a 530 s - Vento 0.1 m/s

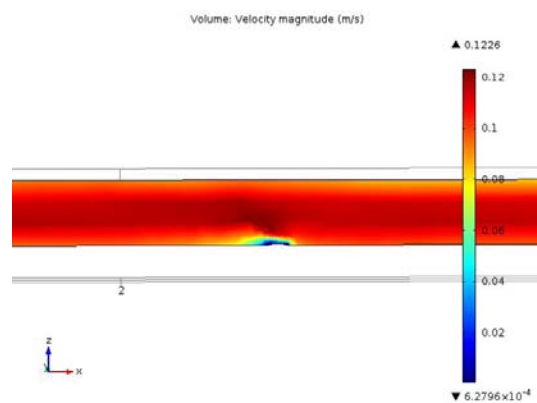


Figura 5.33: Campi di moto a 545 s - Vento 0.1 m/s

Nelle figura 5.34-5.40 sono rappresentati i profili termici all'interno della galleria con un velocità del vento pari a 0,1 m/s.

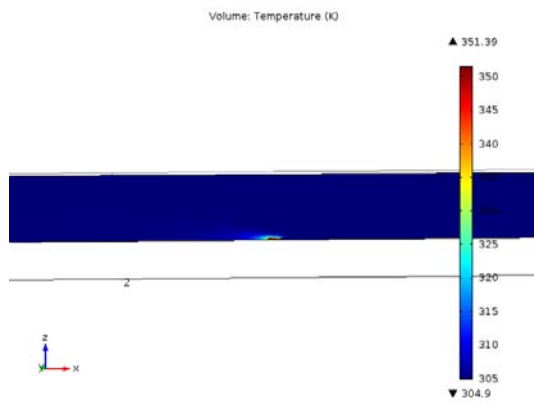


Figura 5.34: Temperatura a 5 s - Vento 0.1 m/s

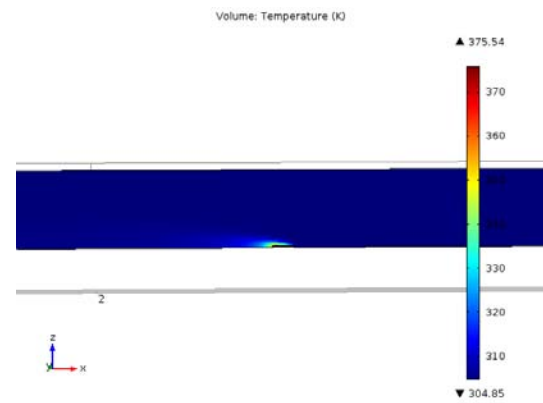


Figura 5.35: Temperatura a 15 s - Vento 0.1 m/s

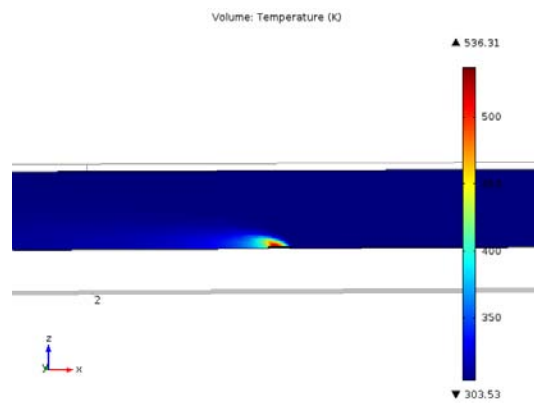


Figura 5.36: Temperatura a 30 s - Vento 0.1 m/s

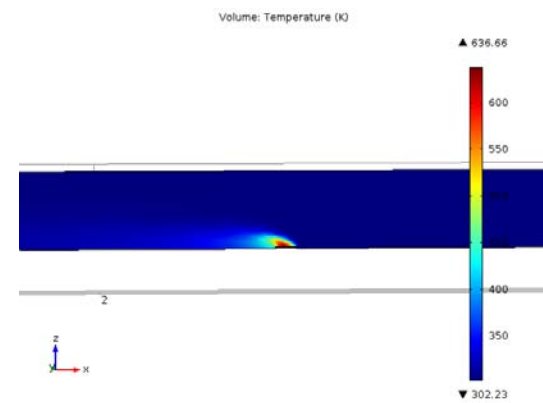


Figura 5.37: Temperatura a 45 s - Vento 0.1 m/s

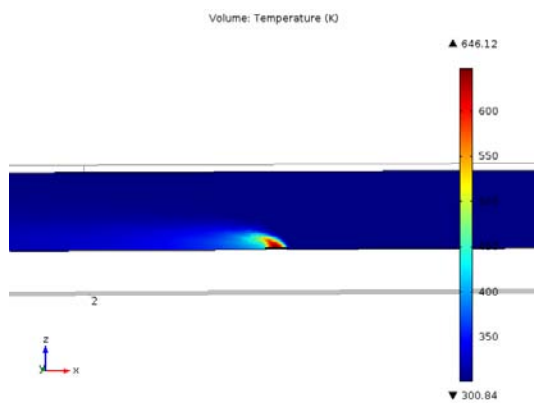


Figura 5.38: Temperatura a 70 s - Vento 0.1 m/s

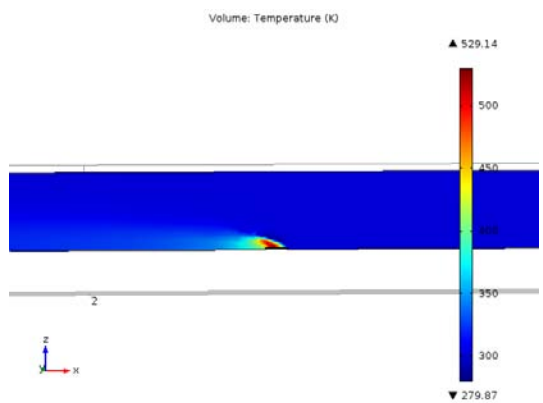


Figura 5.39: Temperatura a 125 s - Vento 0.1 m/s

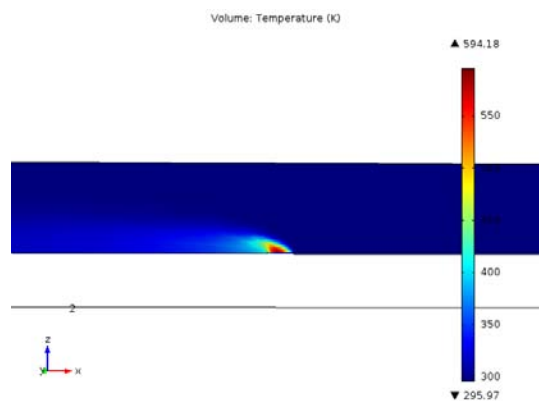


Figura 5.40: Temperatura a 500 s - Vento 0.1 m/s

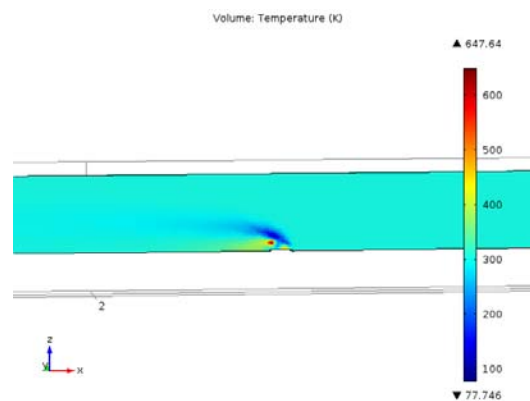


Figura 5.41: Temperatura a 515 s - Vento 0.1 m/s

Anche in questo caso come si può notare nella figura 5.34 la temperatura iniziale è stata fissata a 305 K. Nelle figure 5.34-5.35 la velocità dei gas dei combustioni è troppo bassa per visualizzare un trasporto di energia termica per via convettiva e infatti le basse turbolenze provocano un leggero aumento di temperatura solamente in una zona molto prossima alla superficie superiore della pozza. Nelle figure 5.36-5.39 le turbolenze create a seguito dell'aumento di velocità favoriscono il trasferimento di calore infatti la temperatura arriva fino a 600 K circa al centro della pozza e poi diminuisce fino ad arrivare alla temperatura ambiente man mano che ci si allontana dall'incendio verso la volta della galleria.

Il flusso termico come si nota dalla sequenza temporale di profili a valle della pozza, creando una scia con una temperatura di circa 350-400 K che però a differenza del caso che considerava la velocità del vento dieci volte più piccola, il fronte di fiamma è più schiacciato verso il suolo formando così un flusso di aria calda molto più allungata e aderente al suolo.

Dall'esame di queste figure si comprende come la zona nelle vicinanze del punto 7ab non sia per niente influenzata dal calore emesso in quanto rimane ad una temperatura pressoché costante fino a 305 K. Le figure 5.40-5.41 rappresentano i profili di temperatura rispettivamente nell'istante di fine reazione e subito dopo. Nella prima immagine persiste ancora una zona con una temperatura superiore ai 500 K in vicinanza della pozza e a valle della pozza, ma già dopo 15 secondi dallo spegnimento la temperatura in tutta la galleria è pressoché identica a quella iniziale.

Nelle figure 5.42-5.43 sono riportati i profili di monossido di carbonio e di ossigeno ricavate con queste condizioni al contorno.

Nella prima figura si vede come il CO nel punto 7ab parte da una concentrazione nulla per poi raggiungere dopo circa 200 secondi il valore prossimo ai 0,24 mol/m<sup>3</sup>.

Dopo circa 500 secondi interviene la funzione che azzerava l'ingresso di gas di combustione, provando una discesa del valore di monossido rilevati fino ad arrivare nuovamente ad un valore nullo nel giro di 150-200 secondi.

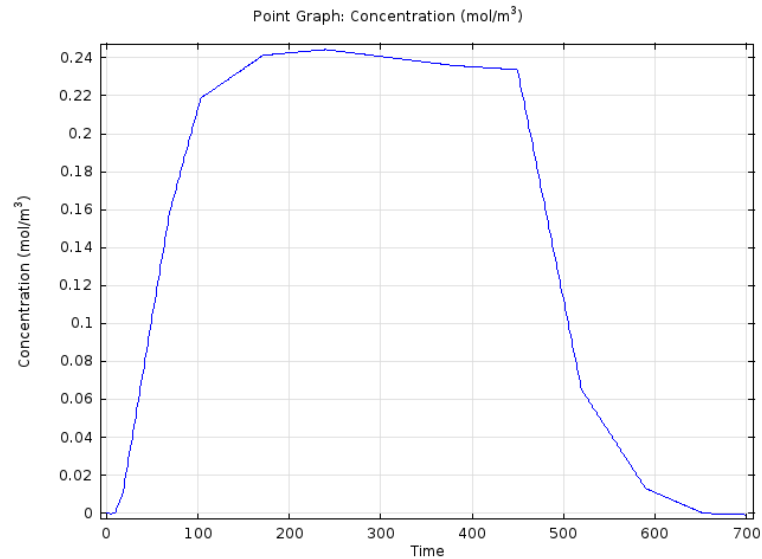


Figura 5.42: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi)

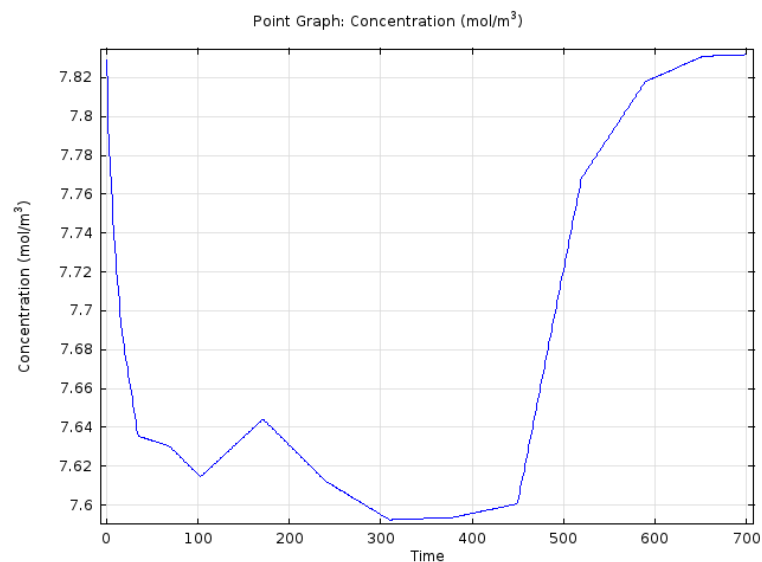


Figura 5.43: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi)

Nella figura 5.43 è riportato il profilo dell'ossigeno rilevata con queste condizioni al contorno. Come per il caso precedente il profilo parte dal valore di 7,83 moli/m<sup>3</sup>, che corrisponde alla concentrazione molare dell'O<sub>2</sub> ad una temperatura di 305 K.

In meno di 100 secondi il valore dell'ossigeno cala fino al valore di  $7,62 \text{ mol/m}^3$  per poi scendere a  $7,6 \text{ mol/m}^3$  nei 200 secondi successivi. Come per il monossido dopo 500 secondi sono stati interrotti tutti i flussi rappresentativi di una combustione infatti dopo 100 secondi dallo spegnimento il valore della concentrazione ritorna al valore iniziale.

### 5.1.3 Simulazione con velocità del vento pari a 0,5 m/s

Questa prova prevede come ipotesi l'impostazione della velocità del vento pari a 0.5 m/s. Con questa condizione al contorno, il moto dei gas che si crea all'interno alla galleria in scala è quello rappresentato nelle figure 5.44-5.53.

Le figure 5.44-5.46, rappresentano tre fotogrammi della fase iniziale dell'incendio, cioè prima della fase stazionaria che è rappresentata dalle figure 5.47-5.49, la fase finale della combustione invece sono rappresentate dalle figure 5.50-5.53

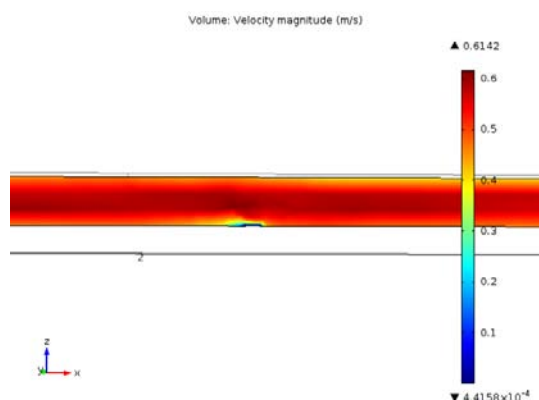


Figura 5.44: Campi di moto a 5 s - Vento 0.5 m/s

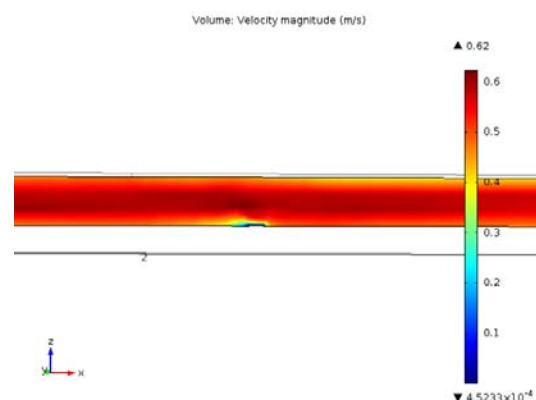


Figura 5.45: Campi di moto a 15 s - Vento 0.5 m/s

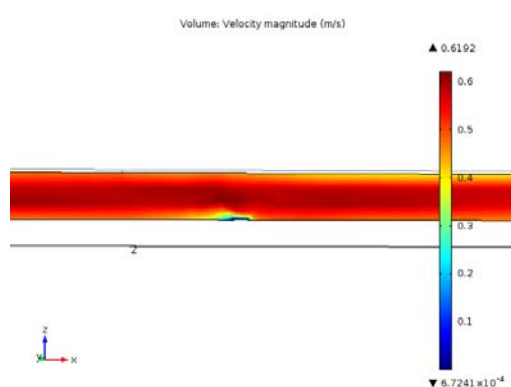


Figura 5.46: Campi di moto a 30 s - Vento 0.5 m/s

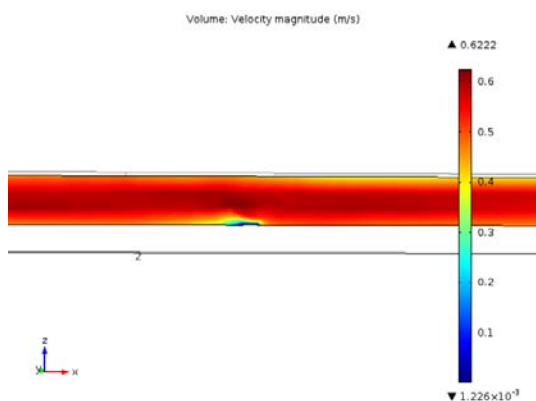


Figura 5.47: Campi di moto a 45 s - Vento 0.5 m/s



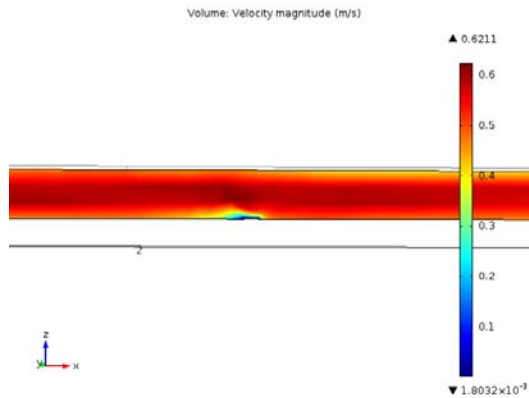


Figura 5.48: Campi di moto a 70 s - Vento 0.5 m/s

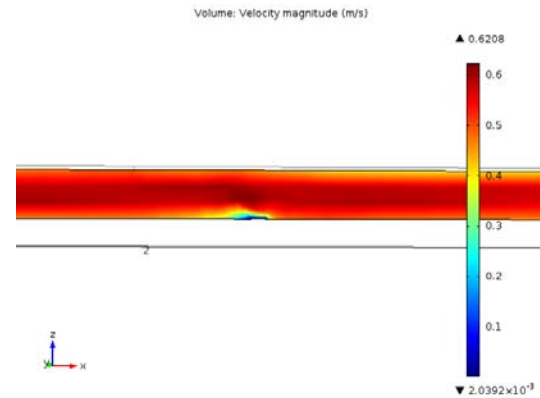


Figura 5.49: Campi di moto a 125 s - Vento 0.5 m/s

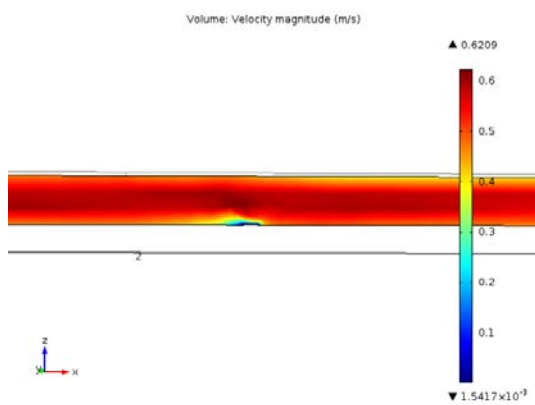


Figura 5.50: Campi di moto a 500 s - Vento 0.5 m/s

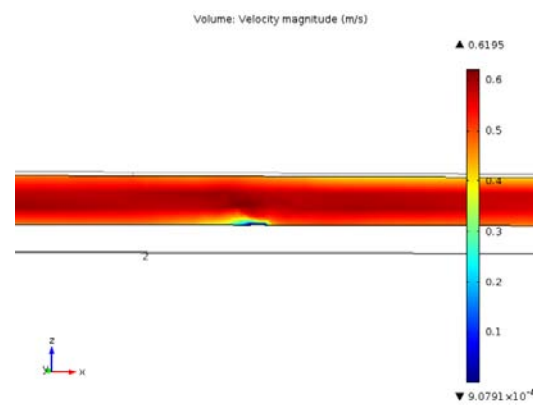


Figura 5.51: Campi di moto a 515 s - Vento 0.5 m/s

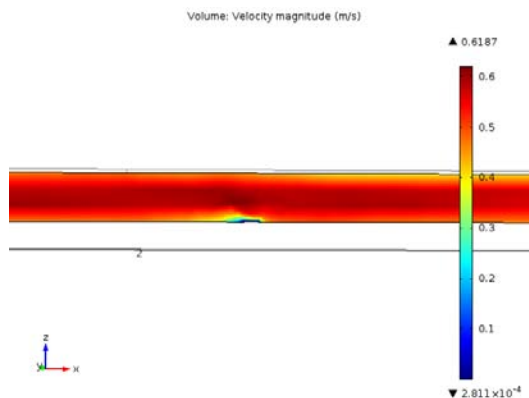


Figura 5.5223: Campi di moto a 530 s - Vento 0.5 m/s

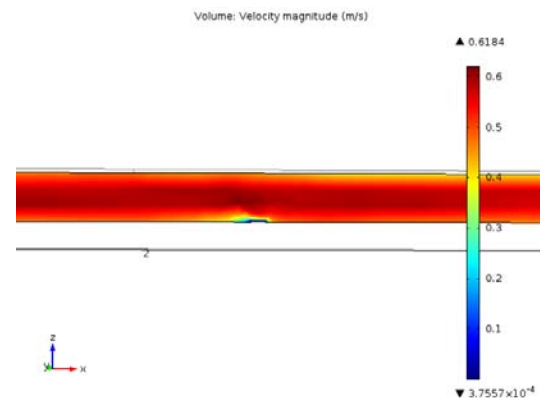


Figura 5.53: Campi di moto a 545 s - Vento 0.5 m/s

Come si può vedere, all'interno della galleria la quantità di flusso d'aria che entra da destra è predominante mantenendo un profilo di velocità pari a quella iniziale per tutta la lunghezza della galleria in quanto i gas di combustione hanno una velocità troppo bassa per influenzare i profili di moto all'interno della galleria. Come già evidenziato nel secondo capitolo per la simulazione dei profili termici è stata utilizzata l'equazione 2.3, che dipende

solamente del diametro della pozza e da alcune costanti. La potenza sviluppata, espressa in watt, è pressoché costante dato che nel corso della combustione abbiamo una variazione dell'altezza della pozza ma nessun cambiamento nel valore del diametro.

Nelle figure 5.54-5.63 sono rappresentate le temperature all'interno del tunnel agli stessi istanti temporali utilizzati per i profili di moto.

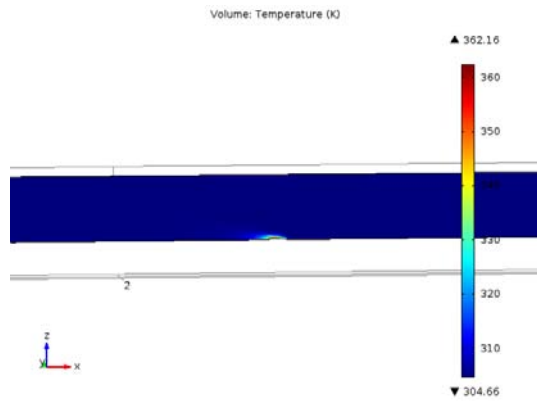


Figura 5.54: Temperatura a 5 s - Vento 0.5 m/s

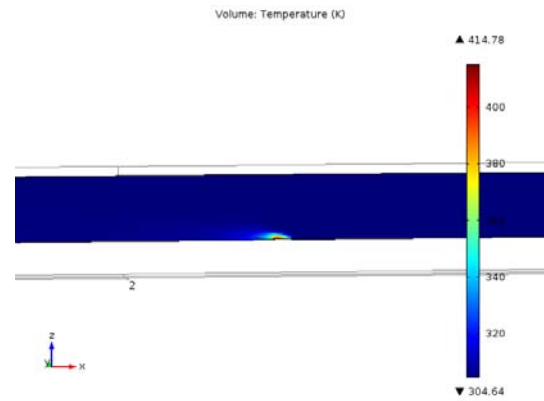


Figura 5.55: Temperatura a 15 s - Vento 0.5 m/s

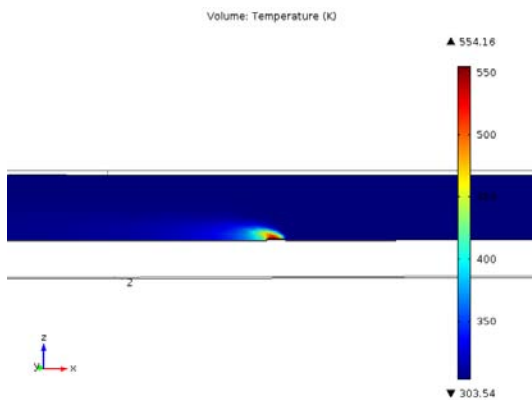


Figura 5.56: Temperatura a 30 s - Vento 0.5 m/s

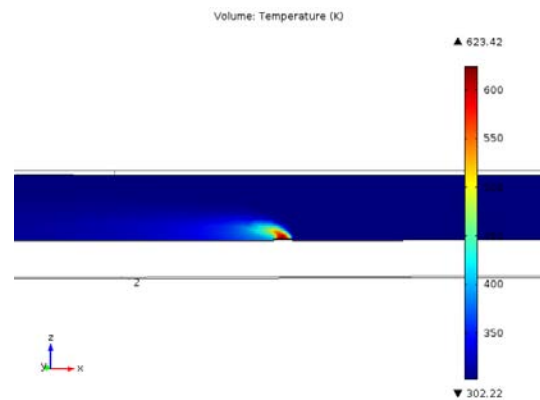


Figura 5.57: Temperatura a 45 s - Vento 0.5 m/s

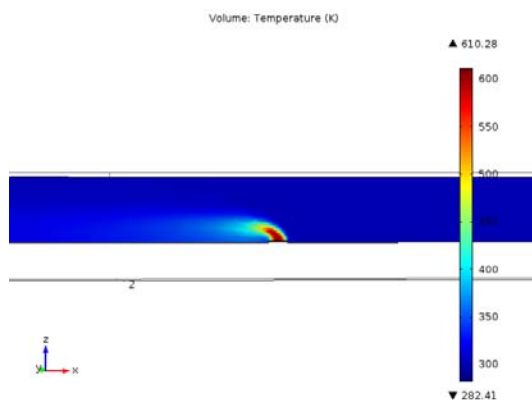


Figura 5.58: Temperatura a 70 s - Vento 0.5 m/s

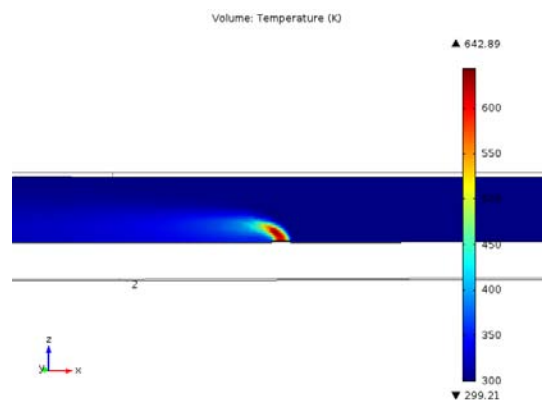


Figura 5.59: Temperatura a 125 s - Vento 0.5 m/s

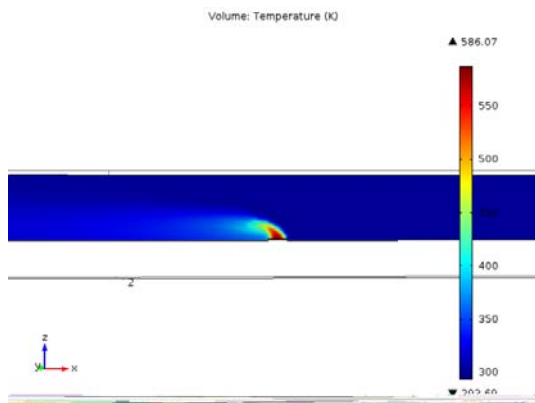


Figura 5.60: Temperatura a 500 s - Vento 0.5 m/s

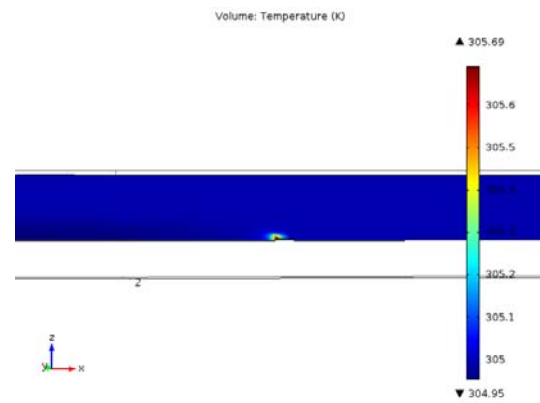


Figura 5.61: Temperatura a 515 s - Vento 0.5 m/s

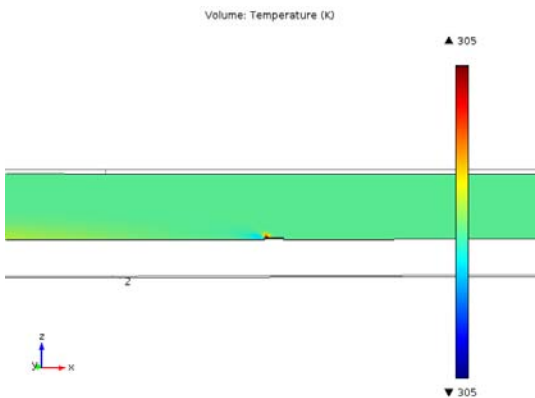


Figura 5.62: Temperatura a 530 s - Vento 0.5 m/s

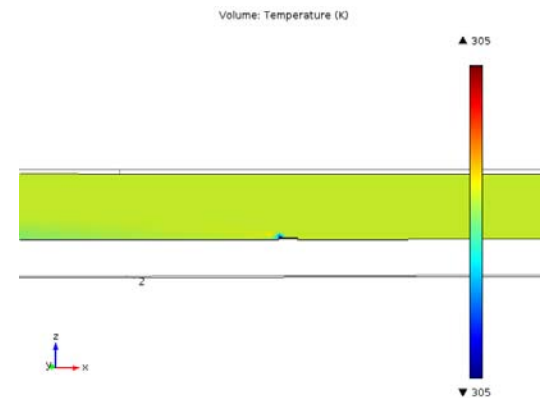


Figura 5.63: Temperatura a 545 s - Vento 0.5 m/s

Dalle figure 5.54-5.64 si può notare come in prossimità della pozza, al massimo regime raggiungiamo una temperatura di circa 550 K, ma a causa dell'alta velocità dell'aria la combustione influenza solo la sezione di galleria a valle della zona di immissione ed in prossimità del suolo invece in prossimità della volta, vicino al punto di campionamento la temperatura rimane costante a 305 K. Questa situazione è molto differente dalla situazione rilevata sperimentalmente, dove nel punto 7ab avevano un incremento di circa 50 gradi rispetto alla condizione iniziale.

Come per i casi precedenti, dalle simulazioni sono stati raccolti i valori di concentrazioni di ossigeno e CO rilevati nel punto 7ab all'interno della galleria.

Con questi valori sono stati costruiti i grafici riportati nelle figure 5.64-5.65.

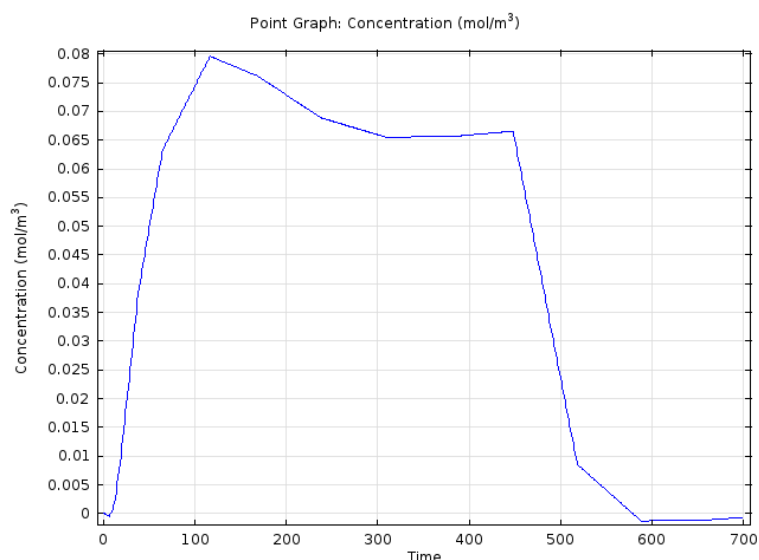


Figura 5.64: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi)

Con queste condizioni al contorno, le concentrazioni di monossido di carbonio risultano troppo elevate rispetto a quelle riscontrate nelle prove sperimentali, infatti il valore massimo registrato in questa prova è pari a 0,08 moli/m<sup>3</sup>. Questo significa che la velocità del vento impostata è troppo bassa e/o la cinetica ipotizzata non rispecchia quella che avviene realmente.

Nella figura 5.65 è riportato il profilo di ossigeno nel tempo ricavato da questa simulazione.

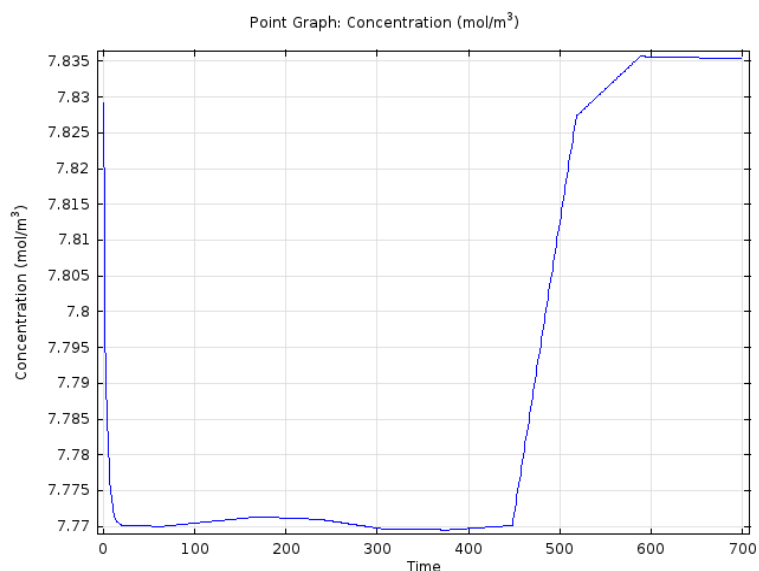


Figura 5.65: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi)

In questa figura si nota come la concentrazione di ossigeno parta da una concentrazione iniziale di 7,83 moli/m<sup>3</sup> e scenda rapidamente a 7,77 moli/m<sup>3</sup>. Questo andamento molto repentino dipende dal fatto che il consumo di ossigeno è stato impostato in funzione della

portata calcolata nel capitolo 2, la quale per pozze di piccole dimensioni riportava una variazione improvvisa e non del tutto simile al profilo che si avrebbe in realtà.

Come per monossido anche il profilo dell'O<sub>2</sub> non si avvicina ai valori rilevati nelle prove nelle quali è stato individuato un consumo 14 volte superiore.

### 5.1.4 Osservazioni

Applicando la cinetica dello schema 1 che considera una sola reazione con una produzione equi-molare di monossido di carbonio e di anidride carbonica, si può osservare come i profili di monossido di carbonio raggiungono valori troppo alti per tutte le velocità del vento impostate.

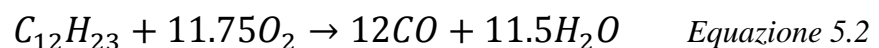
La velocità del vento che porterebbe a ottenere un valore massimo di CO pari a quello sperimentale è pari a 1,25 m/s. questo valore però è escluso, in quanto non rispetta il vincolo che impone una velocità pari o inferiore a 0,5 m/s.

Anche i profili di ossigeno si assestano a valori più elevati rispetto e quelli sperimentali per tutte le velocità del vento.

A differenza dei bilanci di massa, i bilanci di energia sono stati verificati per la velocità del vento pari a 0,01 m/s, riportando un profilo della temperatura discordante di soli pochi gradi rispetto a quelli reali.

## 5.2 Schema cinetico numero 2

In questo secondo studio, utilizzeremo la cinetica rappresentata nelle equazioni 5.2-5.3



Come per il caso 1, i prodotti ottenuti dalla cinetica rappresentata nell'equazione 5.2 sono stati ricavati da uno script in *Matlab* considerando un consumo totale del gasolio presente inizialmente nella pozza. A differenza dello studio precedente il flusso dei gas di combustione è costituito solamente da monossido di carbonio e vapore acqueo e totalmente privo di anidride carbonica, la quale è prodotta unicamente dalla reazione di ossidazione espressa nell'equazione 5.3 impostata in tutto il volume d'aria della galleria.

La velocità di reazione, evidenziata nell'equazione 5.4 può assumere due diversi valori che si differenziano per i coefficienti esponenziali  $v_i$  e per le costanti cinetiche

$$R = k[CO]^{v_1}[O_2]^{v_2}[H_2O]^{v_3} \quad \text{Equazione 5.4}$$

Dove:

- [i] rappresentano le concentrazioni molari dei vari composti;
- $k$  è la costante di equilibrio la quale è stata calcolata secondo l'espressione dell'equazione 5.5.

$$k = A * \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Equazione 5.5}$$

Il valore delle concentrazioni molari del vapore acqueo, del monossido di carbonio e dell'ossigeno utilizzati nell'equazione 5.4 sono ricavati in automatico dal *software COMSOL* in base alle condizioni di pressione, temperatura e velocità impostati caso per caso.

In letteratura sono stati ritrovati due combinazioni di parametri cinetici che descrivono l'equilibrio della reazione riportata nell'equazione 5.3. I valori delle varie costanti e coefficienti utilizzati nei due casi sono elencati nella tabella 5.1,

*Tabella 5.1: Parametri cinetici rispettivamente della "parametri 1" e della "parametri 2"*

	<b>A</b>	<b>Ea</b>	<b>v<sub>CO</sub></b>	<b>v<sub>O<sub>2</sub></sub></b>	<b>v<sub>H<sub>2</sub>O</sub></b>
<b>PARAMETRI 1</b>	48000	3.4E+07	1	1	1
<b>PARAMETRI 2</b>	47700	2.5E+09	1	0.25	1

Nella valutazione dei risultati del secondo schema cinetico non andremo ad esporre i risultati dei bilanci termici allo variare della velocità del vento in quanto la potenza emessa dall'incendio non cambia tra i due schemi in esame e la variazione della portata totale di gas di combustione in ingresso è così infinitesima da non portar modifiche ai risultati del primo caso illustrato.

Quindi anche per questo studio la velocità del vento che riduce al massimo la differenza tra i valori di temperatura rilevati sperimentalmente e quelli ricavati dalle simulazioni è 0.01 m/s. Per lo stesso motivo non verranno rappresentate nuovamente i fotogrammi che appresentano la variazione dei campi di velocità, in quanto le variazioni tra i due studi sarebbero impercettibili con la qualità della *mesh* utilizzata.

Qui di seguito verranno espressi solamente i risultati riguardanti i profili di CO e O<sub>2</sub> ottenuti dalla simulazione.

### 5.2.1 Risultati ottenuti con la cinetica "PARAMETRI 1"

In questo paragrafo saranno descritti i risultati ottenuti considerando l'ossidazione del monossido di carbonio descritta dalla "cinetica 1"

### 5.2.1.1 Velocità 0.01 m/s

Impostando le portate di gas di combustione che rispecchino la reazione evidenziata nell'equazione 5.2 e tutti i parametri cinetici riferiti al caso "parametri 1" ed elencati nella tabella 5.1, sono stati ottenuti i profili di monossido di carbonio e di ossigeno rappresentati rispettivamente nelle figure 5.66 e 5.67.

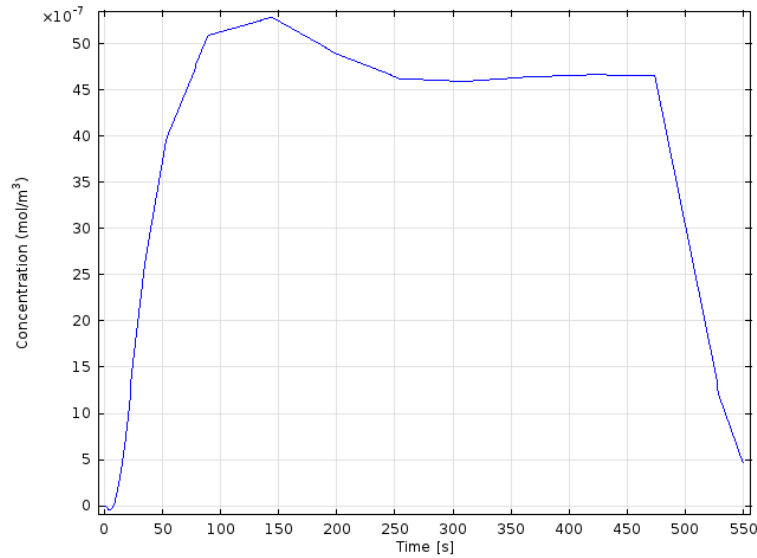


Figura 5.66: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.01 m/s.

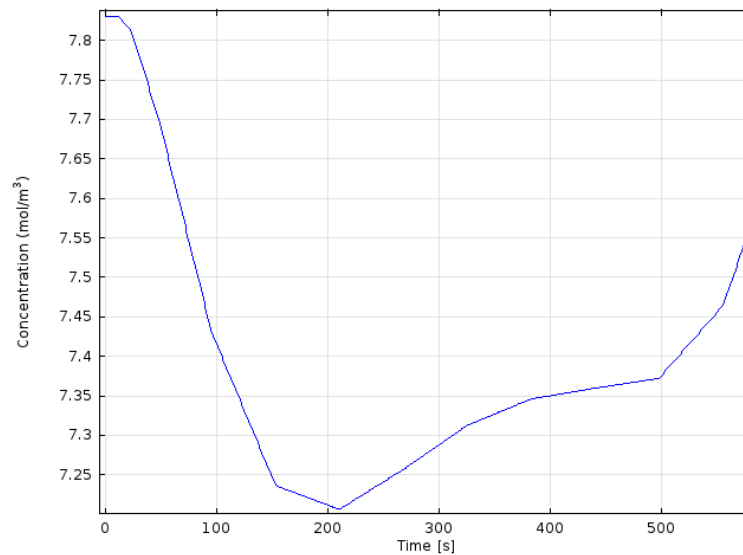


Figura 5.67: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.01 m/s.

Nella figura 5.66, si nota come al tempo iniziale la concentrazione di monossido di carbonio rilevata nel punto 7ab sia di zero moli/m<sup>3</sup> e raggiunga la concentrazione massima di circa 62E-07 moli/m<sup>3</sup> dopo 145 secondi. Nell'intervallo temporale successivo si nota una diminuzione della concentrazione per poi assestarsi attorno al valore di 47E-07 moli/m<sup>3</sup> fino al termine della combustione.

Il basso valore di concentrazione di monossido di carbonio evidenzia l'ossidazione immediata del CO a CO<sub>2</sub> dovuto in parte alle costanti cinetiche utilizzate e dalle alte temperature. Nella figura 5.67 è rappresentato il profilo d'ossigeno il quale inizia da una concentrazione iniziale di 7,83 moli/m<sup>3</sup> per raggiungere dopo 210 secondi la concentrazione minima di circa 7.21 moli/m<sup>3</sup> per poi risalire fino a raggiungere il valore di 7,37 moli/m<sup>3</sup> al momento dello spegnimento. Sia il monossido di carbonio che l'ossigeno raggiungono un valore di concentrazione quasi costante solo quando i profili di temperatura all'interno della galleria raggiungono uno stato stazionario poiché questo l'unico parametro che modifica sia la velocità di reazione sia i coefficienti di diffusione è la temperatura.

### 5.2.1.2 Velocità 0.1 m/s

Impostando una velocità del vento pari a 0.1 m/s, il software restituisce i seguenti profili di concentrazione.

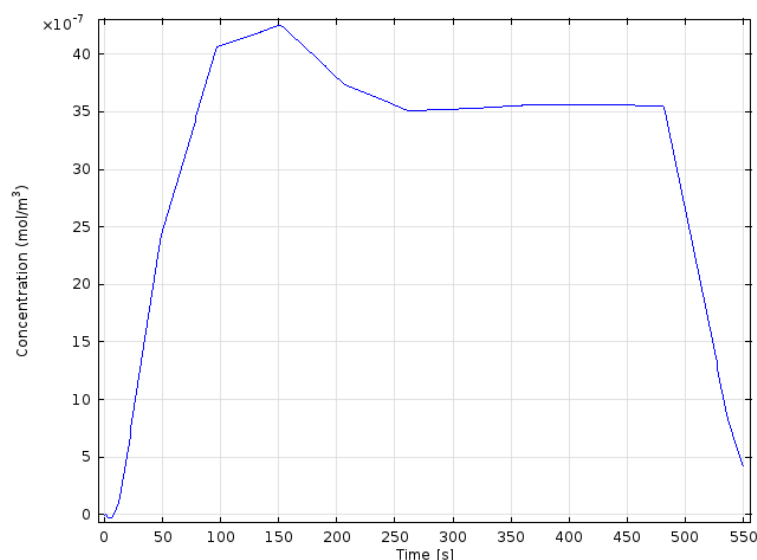


Figura 5.68: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.1 m/s.

Nella figura 5.68 è rappresentato il profilo del monossido di carbonio che come si può osservare raggiunge la massima concentrazione dopo circa 155 secondi, equivalente a 43E-



07 mol/m<sup>3</sup> per poi stabilizzarsi al valore di 36E-07 mol/m<sup>3</sup> una volta che i profili di temperature risultano costanti.

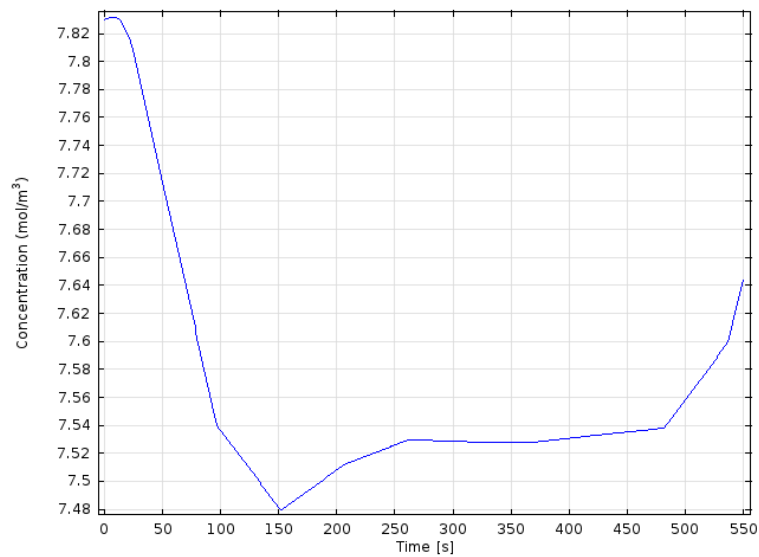


Figura 5.69: Concentrazione (mol/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.1 m/s.

Nella figura 5.69 è riportato il profilo dell'ossigeno ottenuto con questa combinazione di cinetica e velocità del vento. La concentrazione iniziale di ossigeno è sempre 7,83 mol/m<sup>3</sup> essendo quella caratteristica delle condizioni ambientali, ma dopo circa 150 secondi raggiunge il valore di 7,48 mol/m<sup>3</sup> per poi risalire fino ad una concentrazione costante come nel profilo di CO per gli ultimi 200 secondi di reazione. Al termine delle reazione il valore dell'ossigeno tende a risalire grazie al continuo flusso di aria presente all'interno del tunnel raggiungendo le condizioni iniziali in circa 300 s.

Con questa combinazione di cinetica di ossidazione e velocità del vento ipotizzata nessuno dei due composti assume dei valori di concentrazione simili a quelli sperimentali, essendo il CO troppo basso e l'O<sub>2</sub> troppo alto.

In queste condizioni la concentrazione di monossido è leggermente più bassa rispetto al caso precedente dove il flusso d'aria aveva una velocità dieci volte più piccola, l'ossigeno invece raggiunge un valore minimo più alto rispetto al caso precedente. Queste due differenze sono dovuti al fatto che una maggior velocità del vento porta una maggior diluizione del CO e un maggior contributo nel termine di entrata nel bilancio di massa dell'ossigeno.

### 5.2.1.3 Velocità 0.5 m/s

In questo ultimo caso abbiamo impostato un valore di velocità per il flusso pari a 0.5 m/s. Dopo aver risolto tutti i bilanci sono stati ricavati i seguenti grafici i quali riportano i profili di concentrazione del monossido e dell'ossigeno.

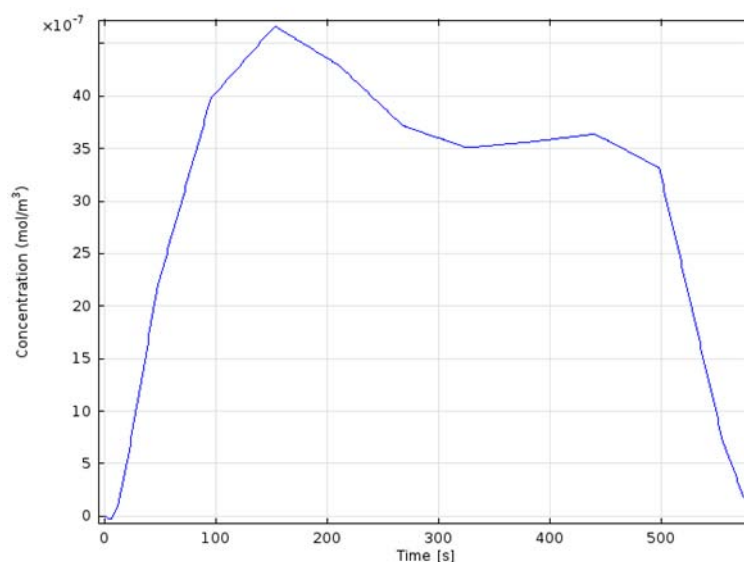


Figura 5.70: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.5 m/s.

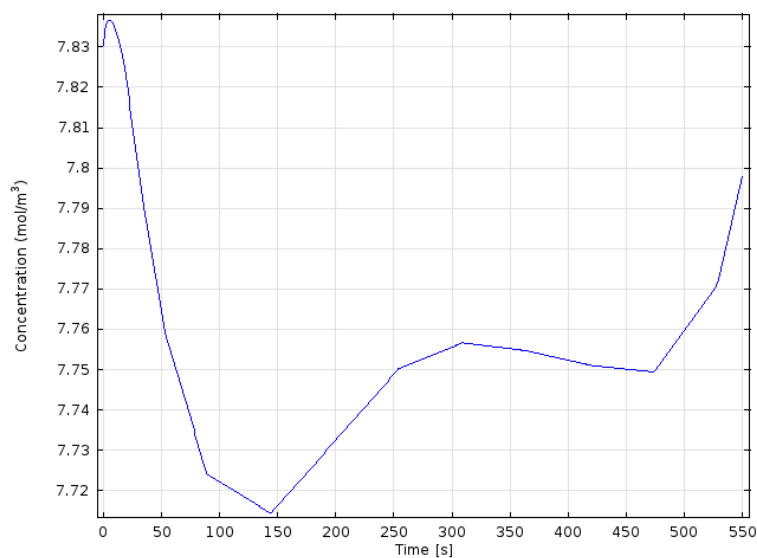


Figura 5.71: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.5 m/s.

Il profilo del CO, rappresentato nella figura 5.70 presenta come per gli altri casi un valore iniziale di concentrazione pari a zero per poi raggiungere il valore di circa 47E-07 moli/m<sup>3</sup>

dopo 150 secondi dall'innesco per poi stabilizzarsi ad un valore di circa  $35E-07$  mol/m<sup>3</sup> una volta che la i profili termici raggiungono la stazionarietà.

Anche il profilo dell'ossigeno ha un andamento simile ai casi precedenti assumendo un valore minimo di  $7.71$  mol/m<sup>3</sup> dopo un intervallo di 150 secondi e poi aumentare lentamente fino al termine della combustione.

Anche in questo caso la combinazione di cinetica e velocità del vento non riportano degli andamenti e dei valori di concentrazione simili a quelli sperimentali. Il monossido di carbonio risulta essere inferiore rispetto al caso reale, invece nella figura 5.71 l'ossigeno data l'elevata velocità del vento assume un valore appena sotto le condizioni iniziali e quindi troppo elevati rispetto al profilo sperimentale.

### 5.2.2 Risultati ottenuti con la cinetica "PARAMETRI 2"

In questo paragrafo saranno descritti i profili di concentrazioni del monossido di carbonio e dell'ossigeno ottenuti combinando l'equilibrio descritto con le costanti cinetiche descritte nel caso "parametri 2" con le varie combinazioni di velocità del flusso d'aria.

#### 5.2.2.1 Velocità 0,01 m/s

Impostando le portate di gas di combustione che rispecchino la reazione evidenziata nell'equazione 5.2, tutti i parametri della "cinetica 2" elencati nella tabella 5.1 e una velocità del vento del vento pari a 0.01 i profili di monossido di carbonio e di ossigeno sono rappresentati rispettivamente nelle figure 5.72 e 5.73

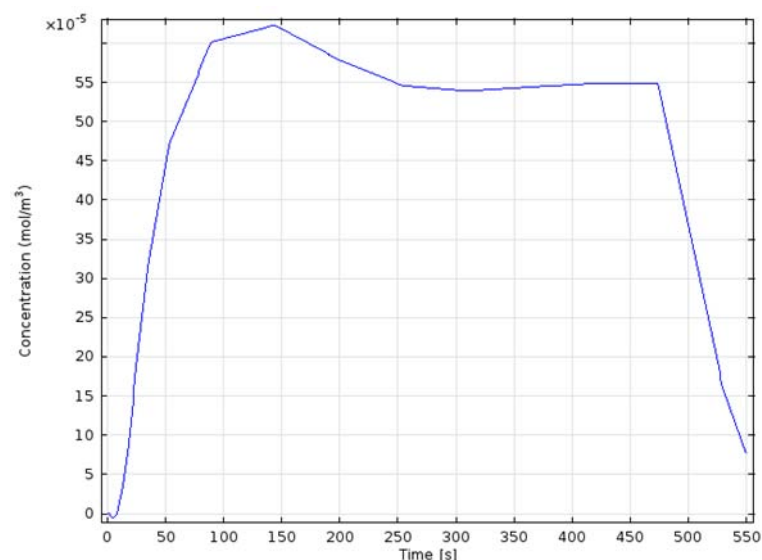


Figura 5.72: Concentrazione (mol/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.01 m/s.

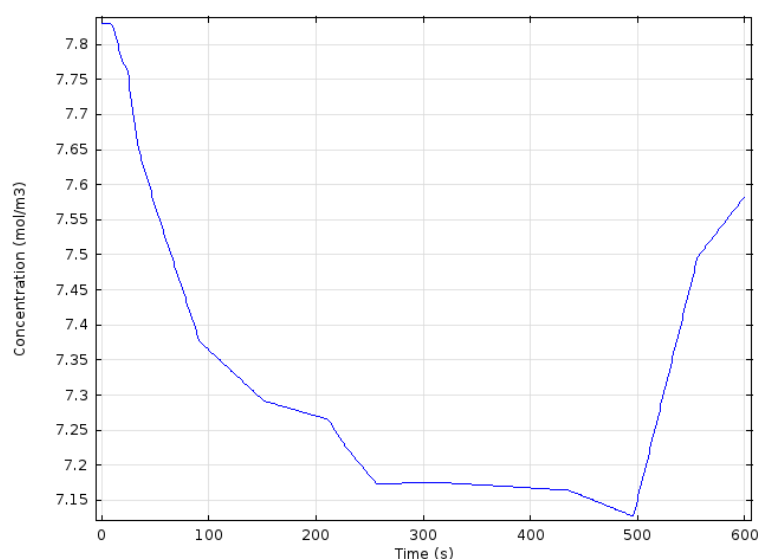


Figura 5.73: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.01 m/s.

Per  $t=0$  nella figura 5.73 si nota che la concentrazione di monossido di carbonio nel punto 7ab è pari zero moli/m<sup>3</sup> come ci si aspetterebbe in condizioni ambientali.

Il CO raggiunge la concentrazione massima di  $57E-05$  moli/m<sup>3</sup> dopo 150 secondi per poi scendere ai  $54E-05$  moli/m<sup>3</sup> nell'intervallo successivo fino al termine della combustione.

Come per il caso che considerava il meccanismo descritto nella "cinetica 1" anche in queste simulazioni le basse concentrazioni di monossido di carbonio sono dovute all'immediata ossidazione del CO a CO<sub>2</sub>.

Nella figura 5.73 è rappresentato il profilo d'ossigeno il quale parte da con la concentrazione iniziale di  $7,83$  moli/m<sup>3</sup> caratteristica delle condizioni ambientali con una concentrazione di  $23,1$  % in massa di ossigeno. La concentrazione scende fino al valore di  $7,15-7,16$  moli/m<sup>3</sup> per poi risalire al termine della reazione fino a raggiungere le condizioni iniziali dopo 650 secondi. L'andamento non lineare assunto dall'O<sub>2</sub> è dovuto sia alla turbolenza sia alla qualità non elevata della mesh.

In questa simulazione il profilo assunto dal monossido è ancora troppo basso rispetto ai dati sperimentali, invece il profilo dell'ossigeno anche se meno disturbato di quello registrato nelle prove reali raggiunge dei valori praticamente identici a quelli descritti nel capitolo 4. Questa combinazione di cinetica e di velocità del vento restituisce dei valori di temperatura e dell'ossigeno quasi completamente identici a quelli sperimentali anche se con andamenti non del tutto simili. Le possibili cause che portano a questa discrepanza tra i due andamenti saranno spiegate nelle conclusioni di questo manoscritto.

### 5.2.2.2 Velocità 0.1 m/s

Impostando una velocità del vento pari a 0.1 m/s, il programma restituisce i seguenti profili.

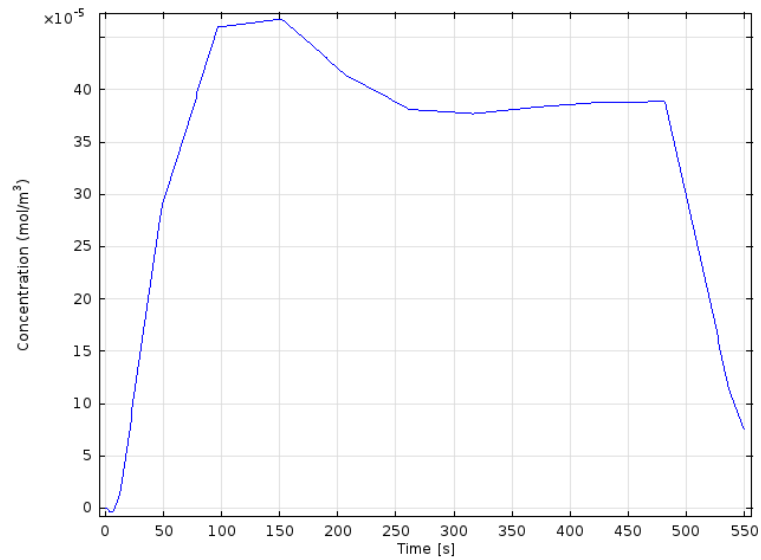


Figura 5.74: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.1 m/s.

Come si può vedere nella figura 5.74 il profilo del CO raggiunge di 47E-05 moli/m<sup>3</sup> dopo circa 150 secondi dall'innesco per poi stabilizzarsi al valore di 38E-08 moli/m<sup>3</sup> una volta che i campi termici si sono stabilizzati.

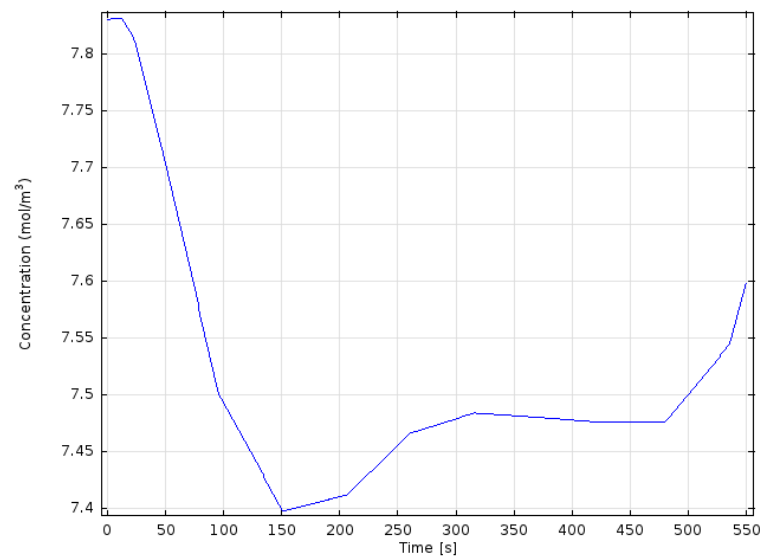


Figura 5.75: Concentrazione (moli/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.1 m/s.

La figura 5.77 riporta il profilo dell'ossigeno ottenuto con questa cinetica e velocità del vento dove la concentrazione iniziale di ossigeno è sempre  $7,83 \text{ mol/m}^3$ , essendo quella caratteristica delle condizioni ambientali, ma dopo circa 150 secondi raggiunge il valore di  $7,4 \text{ mol/m}^3$  per poi aumentare leggermente grazie al contributo della reazione inversa.

Al termine delle reazione il valore dell'ossigeno tende a risalire grazie al continuo flusso di aria presente all'interno del tunnel.

Anche in questo studio la combinazione di due vincoli impostati da noi non restituisce dei profili che rispecchino l'evoluzione riscontrata sperimentalmente, infatti la produzione di monossido e il consumo di ossigeno risultano ancora insufficienti per poter raggiungere i profili esposti nel capitolo 4. Queste due differenze sono dovuti al fatto che una maggior velocità del vento porta una maggior diluizione del CO e un maggior contributo nel termine di entrata del bilancio di massa dell'ossigeno.

### 5.2.2.3 Velocità 0.5 m/s

In questo ultimo caso abbiamo impostato un valore di velocità per il flusso pari a  $0.5 \text{ m/s}$ , uguali al vincolo definito in precedenza. Dopo aver risolto tutti i bilanci sono stati ricavati i seguenti grafici i quali riportano i profili di concentrazione del monossido e dell'ossigeno.

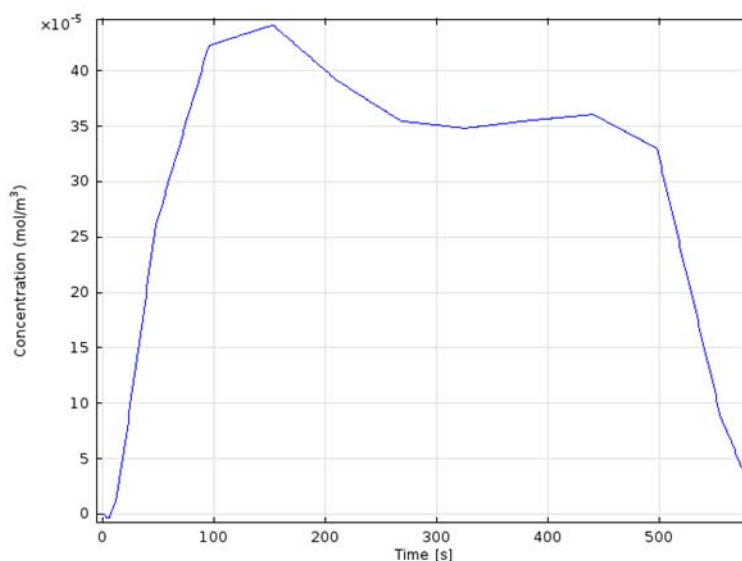


Figura 5.76: Concentrazione ( $\text{mol/m}^3$ ) del CO rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a  $0.5 \text{ m/s}$ .

Il profilo del CO rappresentato nella figura 5.76 presenta come per gli altri casi un valore iniziale di concentrazione pari a zero per poi raggiungere il valore di circa  $44\text{E-}05$  mol/m<sup>3</sup> dopo 150 secondi dall'inizio della reazione e stabilizzarsi come per gli altri casi un valore stazionario, che in questo studio corrisponde ad una concentrazione di  $35/36\text{E-}05$  mol/m<sup>3</sup>.

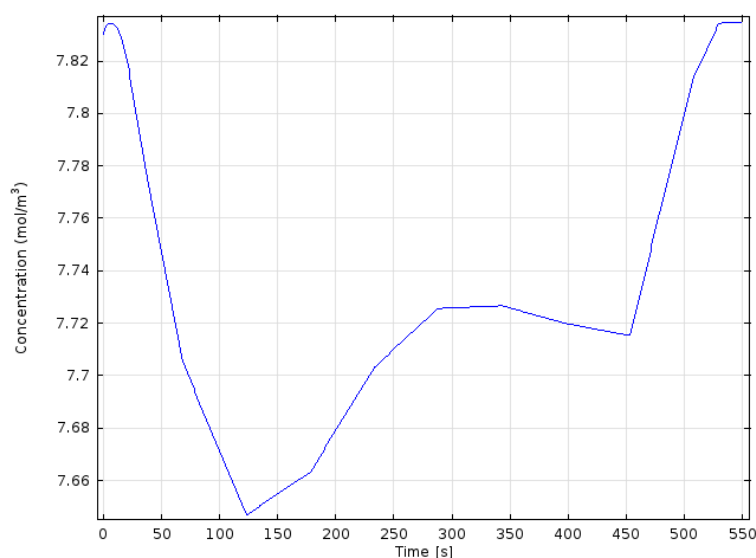


Figura 5.77: Concentrazione (mol/m<sup>3</sup>) del O<sub>2</sub> rilevata nel punto 7ab nel tempo (secondi) con velocità del vento pari a 0.5 m/s.

Anche il profilo dell'ossigeno, evidenziato nella figura 5.77, assume un andamento simile ai casi precedenti avvicinandosi al valore minimo di 7.67 mol/m<sup>3</sup> dopo un intervallo di 125 secondi e poi aumentare lentamente fino al termine della reazione dove si evidenzia un incremento molto più velocizzato.

In questo caso l'aumento della concentrazione dovuto alla reazione inversa a quella di ossidazione del CO è molto più marcato rispetto ai casi precedenti, infatti il contributo di questa reazione riduce del 50 % la diminuzione iniziale di O<sub>2</sub> per gli ultimi 250 secondi di reazione

Anche in questo caso la combinazione di cinetica e velocità del vento non riportano degli andamenti e dei valori di concentrazione simili a quelli sperimentali. Il monossido di carbonio risulta essere inferiore di circa 600 volte rispetto al caso reale, invece l'ossigeno data l'elevata velocità del vento assume un valore appena troppo elevati rispetto al profilo sperimentale.





# Conclusioni

Il lavoro di tesi rappresenta uno studio preliminare che aveva come obiettivo la determinazione dei profili termici e delle concentrazioni di alcuni prodotti che si sviluppano all'interno di una galleria stradale a seguito di un incendio di pozza.

Per quanto riguarda il primo obiettivo si è dimostrato che l'equazione che descrive la potenza emessa e specifica per gli incendi di pozza che hanno come combustibile il gasolio descrive in modo sufficientemente accurato l'evoluzione della temperatura all'interno della galleria. Bisogna però precisare che la potenza sviluppata dipende solamente dal diametro della pozza e da nessun altro parametro della sostanza coinvolta o condizione ambientali, infatti gli altri termini presenti all'interno sono delle pure costanti caratteristiche del combustibile.

Un fattore che aiuta la simulazione del profilo termico deriva dal fatto, come già detto, che il diametro della pozza, come nelle prove sperimentali, rimane costante e si registra la sola variazione dell'altezza della pozza la quale però non compare come variabile nell'equazione utilizzata.

L'altra variabile che influenza i bilanci termici è la velocità del vento all'ingresso del tunnel, che come già spiegato deve avere un valore compreso nell'intervallo tra i 0 m/s e i 0,5 m/s.

Dopo varie simulazioni si è riscontrato che il valore della velocità dell'aria all'ingresso del tunnel che riproduce un profilo termico con un valore massimo della temperatura discordante di solo 5 gradi rispetto a quello sperimentale è pari a 0,01 m/s.

Per quanto riguarda il flusso che evapora dalla pozza si è notato fin dall'inizio dello studio che l'equazione che descrive il flusso di combustibile che si libera sotto forma di vapore dalla pozza incrementa molto velocemente nei primi istanti della combustione per poi stabilizzarsi ad un valore costante, differente da un profilo realistico dove l'andamento sarebbe più lineare.

Il valore che il flusso massivo assume per quasi tutto l'intervallo è poco influenzato dalla velocità del vento, infatti si presume che le basse velocità dell'aria in ingresso e la piccola superficie della pozza non riescano a contribuire in modo evidente sui profili ricavati.

I valori di flusso ricavati dalle simulazioni di *Matlab* determinano un intervallo di reazione pari a circa 500 secondi, simile a quello registrato nelle prove sperimentali pari a 470 secondi.

Si è notato come l'equazione utilizzata per il calcolo delle flusso di combustibile assuma un andamento più realistico per pozze almeno dieci volte superiori a quella in esame, infatti come sarà spiegato in seguito per gli studi futuri si dovrà cercare un'equazione adatta anche le pozze di piccole dimensioni.

Questa approssimazione va ad aggiungersi all'indeterminazione sulla cinetica che descrive la complessa reazione di combustione in queste condizioni. Per questo motivo in questo studio sono state ipotizzate due differenti cinetiche molto semplificate della combustione; una che prevede una produzione equimolare di monossido di carbonio e di anidride carbonica e l'altra che prevede una produzione iniziale di acqua e monossido di carbonio il quale successivamente si ossida ad anidride carbonica.

Come dimostrato nei grafici esposti nel capitolo 5 tutti i profili del CO ricavati presentano delle concentrazioni molto inferiori rispetto a quelle registrate nelle prove sperimentali e nemmeno con una velocità del vento pari a 0,01 m/s, cioè con ambiente pressoché stagnante, si avvicina ai valori che ci aspettavamo.

Per quanto riguarda la concentrazione dell'ossigeno abbiamo riscontrato dei profili che dipendono molto dalla velocità del vento in ingresso poiché per una velocità dell'aria pari a 0.1m/s o a 0.5 m/s la concentrazione di ossigeno subisce una minima variazione essendo il termine di consumo quasi pari a quello di ingresso.

Nel caso della prima cinetica in esame con la velocità del vento uguale a 0.01 m/s si registra una diminuzione di ossigeno nel sistema più marcata ma non sufficiente a raggiungere i valori sperimentali.

Un valore molto simile a quello rilevato nelle prove a Genova è stato riscontrato considerando il secondo schema cinetico con una velocità dell'aria in ingresso pari a 0.01 m/s, infatti le simulazioni hanno restituito un valore minimo pari a 7,15-7,14 mol/m<sup>3</sup> contro il valore di 7,12 delle prove sperimentali.

Come conclusione di questo studio preliminare di modellazione degli incendi in galleria, si può affermare che il confronto tra i profili termici reali e quelli simulati sono accettabili per la velocità del vento pari a 0,01 m/s, mentre per quanto riguarda i profili dei prodotti sono accettabili solo quelli dell'ossigeno considerando il secondo schema cinetico in esame ed ancora una velocità del vento pari a 0,01 m/s.

Per quanto riguarda lo studio dello sviluppo di monossido di carbonio e del consumo di ossigeno i profili ottenuti sono molto approssimativi e quindi risulta necessario eseguire nuovi studi riducendo le approssimazioni fatte sullo schema cinetico attraverso una ricerca più dettagliata delle parametri di reazione utilizzando schemi cinetici più complessi.

In secondo luogo ci si propone di utilizzare un'equazione che descriva i profili della temperatura della pozza e del flusso di combustibile che si libera dalla pozza in modo più accurato, rispetto al modello di incendio di pozza del TNO.

Infine va ricordato che le simulazioni riportate nel presente lavoro di tesi si riferiscono a dati ottenuti in un tunnel in scala ed utilizzando come combustibile il gasolio bianco.

Un'altra miglioria si può apportare ripetendo le prove sperimentali ed utilizzando uno strumento per il rilevamento della velocità in ingresso con una maggiore sensibilità in modo

da eliminare fattori di incertezza nelle future simulazioni. Inoltre sarebbe opportuno affinare il sistema di monitoraggio e analisi dei fumi di combustione.

Occorre quindi implementare il presente modello termo fluidodinamico con un pacchetto software per la simulazione di processi complessi di reazioni di combustione che tengano conto della composizione completa del materiale coinvolto in incendi in tunnel.

In conclusione il lavoro presentato rappresenta solo la fase preliminare di uno studio più complesso. Il principale risultato finora ottenuto è lo sviluppo di un codice base CFD per la descrizione della termo fluidodinamica di tunnel stradali monocanna che permette di riprodurre con discrete approssimazioni il profilo termico determinato sperimentalmente.



# Nomenclatura

A: area superiore della pozza [m<sup>2</sup>];  
Cp: calore specifico del liquido [J/KgK];  
H: flusso di calore [J/m<sup>2</sup>s];  
Lv: calore latente di vaporizzazione [J/Kg];  
t: tempo [s];  
ur: velocità di regressione della superficie superiore [m/s];  
V: volume della pozza [m<sup>3</sup>];  
ρ: densità del liquido [Kg/m<sup>3</sup>];  
D: diametro della pozza [m];  
C3: coefficiente;  
C4: coefficiente;  
C5: coefficiente;  
Cm: coefficiente;  
u<sub>10</sub>: velocità del vento ad una altezza di 10 m [m/s];  
Sc: numero di *Schmidt*.  
T: temperatura [K];  
P: pressione [bar];  
v<sub>i</sub>: specie i  
**u**: vettore delle velocità nelle tre dimensioni [m/s];  
k: costante cinetica turbolenta [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>];  
ε: epsilon [J/Kg];  
μ<sub>T</sub>: viscosità turbolenta [cP];  
ρ: densità [kg/m<sup>3</sup>];  
P<sub>k</sub>: pressione [bar];  
c<sub>i</sub>: concentrazione della specie i [mol/l];  
D<sub>i</sub>: coefficiente di diffusione della specie i [m<sup>2</sup>/s];  
R<sub>i</sub>: velocità di consumo/produzione della specie i [mol/s];  
N<sub>i</sub>: flusso della specie i;



# Allegati

## Allegato 1

```
% function Pozza_Riccardo
% Riscaldamento di un bagno di olio
clc
clear all
close all
% global M A H Ta D d lab Ts cp R PM Cm u1 beta Dv Vo ur w W

beta= 0.4; % Coefficiente per determinare la velocità del vento a 10 m di altezza [0.25
terreno rugoso - 0.5 terreno piano con stabilità]
u1= 0.015; %--> Velocità vento a 1 m di altezza [m/s]
ur= 6.6e-06;% --> Velocità di regressione della superficie della pozza in 7 minuti [m/s]
Cm=0.0004786; %--> Costante per il calcolo della costante di mass transfert
PM=115; % --> Peso molecolare [Kg/Kmol]
R=8.3144; % --> Costante dei gas [J/Kgmol]
Dv=0.0000006348;% --> Coef. di diffusione del vapore di gasolio in aria [m2/s]
% cp=2050;
% d=830;
D = 0.062; % Diametro pozza [m]
M = 0.000012; % Massa di olio [Kg]
Vo=12/1000000;%--> Volume iniziale della pozza (m3)
% cp --> Calore specifico dell'olio [J/KgK]
% d --> Densità liquido [Kg/m3]
lab = 0.149; % --> Conducibilità termica gasolio. Dovrebbe essere dipendente dalla
temperatura
A = (D/2)*(D/2)*3.1428; % Area di scambio [m2]
H = 20; % Conduttanza termica [W/m2K]
Ta = 293; % Temperatura aria [K]
Ts = 288; % Temperatura suolo [K]
%Qr= [140000*exp(-0.12*D)]+20000*[1-exp(-0.12*D)]; % Calore prodotta dalla
combustione

AA = 4.10549;
BB = 1625.928;
CC = -92.839;
```

```
C5=-8.11191;
C6=0.272987;
C7=-0.0000557681;
```

```
% Condizioni iniziali
```

```
tspan = [0, 450]; % intervallo di integrazione
y0 = 288; % condizione iniziale
options = odeset('RelTol',1e-5,'AbsTol',1e-6);
[t,y] = ode15s(@funzione,tspan,y0,options,beta,u1,ur,Cm,Dv,D,Vo,lab,A,H,Ta,Ts); %
soluzione numerica
```

```
%% Post-processing
```

```
figure
plot(t,y(:,1));
xlabel('Time [s]'),ylabel('Temperatura [°K]')
```

```
P = zeros(length(t),1);
w = zeros(length(t),1);
```

```
for i1 = 1:length(t)
    % CALCOLO DELLA PRESSIONE DI SATURAZIONE
    P(i1)=10^(AA-(BB/(y(i1)+CC)));
    %-----
    %CALCOLO DELLA DENSITÀ DEL LIQUIDO (d)
    A1 = 0.301;
    B1 = 0.307;
    C1 = 469.7;
    g = y(i1)/C1;
```

```
function dydt=funzione(t,y,beta,u1,ur,Cm,Dv,D,Vo,lab,A,H,Ta,Ts)
% global cp A H Ta d Qr Qc lab Ts M Qa D PM R h u10 u1 beta Cm Sc k Dv V Vo Vf w dxdt
ur W
```

```
% dydt = ((A)/(cp*d*V))*((Qa+Qr+Qc)-(d*h*ur));
```

```
%-----
```



% CALCOLO DEL VOLUME DELLA POZZA

$$V = V_0 - u_r * A * t;$$

%-----

% CALCOLO DEL CALORE SPECIFICO (cp)

$$C5 = 0.2713;$$

$$C6 = 0.001;$$

$$C7 = 0.00000012128;$$

$$cp = (C5 + (C6 * y) + (C7 * (y^2))) * 4186;$$

%-----

% CALORE DI VAPORIZZAZIONE (h)

$$C1 = 83.612;$$

$$C2 = 313;$$

$$C3 = 469.7;$$

$$C4 = 0.38;$$

$$h = (C1 * ((C3 - y) / (C3 - C2))^{C4}) * 4186;$$

%-----

%CALCOLO DELLA DENSITÀ DEL LIQUIDO (d)

$$A1 = 0.301;$$

$$B1 = 0.307;$$

$$C1 = 469.7;$$

$$g = y / C1;$$

$$j = -(1 - g)^{0.2857};$$

$$d = (A1 * (B1^j)) * 1000;$$

%-----

% CALCOLO DELLA PRESSIONE DI SATURAZIONE

$$AA = 4.10549;$$

$$BB = 1625.928;$$

$$CC = -92.839;$$

$$P = 10^{(AA - (BB / (y + CC)))};$$

%-----

% VELOCITÀ A 10 m DI ALTEZZA [m/s]

$$u_{10} = u_1 * (10/1)^{(\beta)};$$

%-----

% CALCOLO DELLA VISCOSITÀ DEL VAPORE (Vi vi)

$$C5 = -8.11191;$$

$$C6 = 0.272987;$$

$$C7 = -0.0000557681;$$

$$Vi = (C5 + (C6 * y) + (C7 * (y^2))) / 10000000; \text{ % Viscosità dinamica [Pa*s= Kg/m*s]}$$

$$vi = Vi / d; \text{ % Viscosità dinamica vapore [m2/s]}$$

%-----

% CALCOLO DI SCHMIDT

$$Sc=vi/Dv;$$

%-----

% CALCOLO DEL COEF. DI MASS TRANSFERT [m/s]

$$k= Cm*(u10^{(0.78)})^2*((D/2)^{(-0.11)}*(Sc)^{(-0.67)});$$

%-----

% CALCOLO DEI CALORI CHE PARTECIPANO ALL'EVAPORAZIONE [W/m2]

$$Qa= H*(Ta-y); \text{ \% Calore che deriva dallo scambio termico con l'aria}$$

$$Qc= (lab*(Ts-y))/\text{sqrt}((3.1428)*(lab/(d*cp))); \text{ \% Calore che deriva dallo scambio termico con il suolo}$$

$$Qr= (140000*\text{exp}(-0.12*D))+20000*(1-\text{exp}(-0.12*D)); \text{ \% Calore prodotta dalla combustione}$$

%-----;

% CALCOLO DELLA PORTATA DI VAPORE (w)

$$\text{\% } w =k*ci \text{ --> ci concentrazione del vapore del combustibile al di sopra}$$

% della pozza = pressine di saturazione

$$w= (k*P)*1000*A; \text{ \% [gr/s]}$$

$$dydt = ((A)/(cp*d*V))*((Qa+Qr+Qc)-(d*h*ur));$$

# Riferimenti Bibliografici

- Maschio, G, Vianello, C, Fabiano, B, Palazzi, E, (2012). *Experimental study on thermal and toxic hazards connected to fire scenarios in road tunnels*.
- Marcon, G., (2008). *Analisi sperimentale degli effetti di incendi in galleria mediante modello in scala*. Tesi di laurea in Ingegneria Chimica, Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Padova.
- Panzavolta, D., (2009). *L'analisi di rischio della progettazione delle gallerie stradali*. Tesi di laurea in Costruzione di strade, ferrovie ed aeroporti L-S, Università di Bologna.
- Ahrens, M. (2005) U.S. *Vehicle fire trends and patterns*. Quincy, MA: National Fire Protection Association ed.
- Berrefors, G. (1996). *Air pollutants in road tunnels. The Science of Total Environment*, 189/190, 431/435.
- Carvel, R.O., Beard, A. N., Jowit, P. W. & Drysdale, D.D. (2004). *The influence of tunnel geometry and ventilation on the heat release rate of fire*. Fire Technology.
- Ministero dell'Interno. (2000). *Prova a fuoco in galleria stradale*. Internal Report. Roma: Direzione generale della Protezione Civile e dei servizi Antincendi, Corpo Nazionale dei vigili del Fuoco.
- Novozhilov, V. & Koseki, H. (2010). *CFC prediction of pool fire burning rates and flame feedback*. Combustion Science and Technology.
- Galdo, M. Maria, K. A. D., Fernández, J.M O, Ballesteros, T. R., Santolaria, M.C. (2007). *Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: memorial Tunnel Case*. Science Direct.
- Geier, M, Shaddix, C. R., Holzleithner, F. (2012). *A mechanistic char oxidation model consistent with observed CO<sub>2</sub>/CO production ratios*. ScVerse ScienceDirect.
- Glassman, I. Yetter, R. A.. *Combustion, Fourth edition*. Elsevier.
- Stephen, R. Turn. *An introduction to combustion, Second edition*. McGraw Hill.
- Quintiere, J. G.. *Fundamentals of fire phenomena*. John Wiley & Son, LTD.



# Ringraziamenti

Sono molte le persone che desidero ringraziare al termine di questi anni di studio impegnativi, ma pieni di soddisfazioni.

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Giuseppe Maschio e l'Ing. Chiara Vianello per la collaborazione nella realizzazione di questo lavoro di tesi.

Ringrazio con tutto il cuore i miei genitori, mamma Franca e papà Renzo, che mi hanno sempre sostenuto e spinto a tirare fuori il meglio di me.

Ringrazio i miei fratelli, Enrico e Stefano, che mi hanno sempre accompagnato in questi 25 anni e tutto sommato anche se un po' lunatici, sono degli ottimi fratelli.

Un saluto ed un abbraccio alle mie due nonne, Elena ed Assunta.

Desidero inoltre ricordare e mandare a quel paese Fabio, Christian, Marco, Irene, Emanuela, Cristina e Marco che finalmente tra un paio di mesi non potranno più dire che non faccio niente dalla mattina alla sera, ma sotto sotto sono degli ottimi amici.

Ringrazio inoltre i miei compagno di treno e soci nell'attività della "*Merk*", Enrico (Bega 1) e Luca (Bega 2) per tutte le chiacchierate e dormite fatte durante i lunghissimi viaggi.

Devo ricordare anche tutti gli altri compagni delle varie attività avviate in questi ultimi anni, da Stefano, Marco e Alessandro nell'attività "*Pronto Tenda*" specializzata nella fornitura di capannoni ed Enrico nell'attività "*Balilla*" specializzate in pasta fatta in casa.

Desidero inoltre ricordare tutti i miei amici del QDQDC e compagni del tavolo "*Rum e Pera*" per le fantastiche feste fatte ogni mese per quasi due anni, sperando di ripetere queste serate per moltissimi anni ancora.

Desidero inoltre ricordare tutti i miei colleghi assistenti della Piscina di Oderzo per tutte le giornate e week end estivi passati insieme. Anche se per andare a lavorare ho perso quasi tutti i week end di mare, la birra fresca della domenica sera ripagava di tutti i sacrifici.

Un grazie ed un saluto a tutti i miei compagni di corso che con la loro simpatia mi hanno permesso di passare al meglio questi anni di studio, rendendoli meno pesanti con spritz, feste e pause caffè, anche se hanno contribuito in minima parte allo sfratto dal mio primo appartamento universitario.

Un saluto ed un ringraziamento al Moto Topo Garage per i suoi fantastici spritz e stuzzichini. Saluto tutti i miei amici della *Pitona Summer*, la miglior festa della birra.

Ringrazio anche tutte quelle persone che non ho nominato ma che comunque hanno avuto un ruolo importante nella mia vita.

