

PROVA FUOCO IN GALLERIA STRADALE

Autori:

- *Ingg. Ennio AQUILINIO e Fabrizio COLCERASA, Geom. Andrea BALDINO*
Ministero dell'Interno
D.G.P.C. e S.A.
Servizio Tecnico Centrale
Ispettorato per l'Emergenza
P.zza Viminale
00100 Roma
- *Ingg. Antonio GAMBARDELLA e Francesco NOTARO*
Ministero dell'Interno
D.G.P.C. e S.A.
Servizio Tecnico Centrale
Ispettorato per la Formazione Professionale
Via Cavour, 5
00100 Roma
- *Ingg. Ugo BONESSIO e Mauro CACIOLAI*
Ministero dell'Interno
D.G.P.C. e S.A.
Centro Studi ed Esperienze
Laboratorio di Scienza delle Costruzioni
P.zza Scilla, 1
00100 Capannelle (Roma)
- *Ingg. Claudio MARTINES e Gaetano VALLEFUOCO*
Ispettorato interregionale vigili del fuoco per il Veneto e Trentino Alto Adige
Via Dante, 55
35139 Padova
- *Ingg. Elio ANDO' e Giuseppe RUFFINO*
Comando provinciale vigili del fuoco di Vicenza
Via Farini, 16
36100 Vicenza
- *Ing. Vincenzo BENNARDO*
Comando provinciale vigili del fuoco di Torino
C.so regina Margherita, 330
10141 Torino
- *Ingg. Emilio CAFARO, Carlo CIMA e Andrea DEMONTE*
Politecnico di Torino
Dipartimento di Energetica
C.so Duca degli Abruzzi, 24
10129 Torino
- *Dott. Eugenio GONZATO, Dott. Carlo LEPORE, Ing. Sergio TESSARI*
Società Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova S.p.A.
Via Flavio Gioia, 71
37136 Verona
- Personale vigile del fuoco del Centro Documentazione e Relazioni Pubbliche del Corpo nazionale dei vigili del fuoco e dei Centri Documentazione Video e Fotografici dei Comandi provinciali vigili del fuoco di Bologna, Firenze, Torino e dell'Ispettorato interregionale vigili del fuoco per il Veneto e Trentino Alto Adige

Sommario

Nell'ambito di una collaborazione tra la Società Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova S.p.A. (di seguito denominata brevemente Società Autostrada) e l'Ispettorato interregionale vigili del fuoco per il Veneto e Trentino Alto Adige, iniziata già nell'ottobre del 1998 e, quindi, ancor prima che si verificassero le tragedie all'interno delle gallerie stradali del Monte Bianco (24 marzo 1999, Aosta-Italia) e dei Monti Tauri (settembre 1999, Austria), è stata effettuata in data 11 dicembre 1999 una *prova a fuoco* all'interno di una delle gallerie stradali dismesse denominata "Colli Berici", sita sull'autostrada A4 tra i caselli di Vicenza Est e Vicenza Ovest e data in gestione alla medesima Società Autostrada.

La prova a fuoco, che è stata condotta dal Laboratorio di Scienza delle Costruzioni del Centro Studi ed Esperienze del Corpo nazionale dei vigili del fuoco di concerto con il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, ha avuto lo scopo di acquisire utili informazioni sugli incendi in galleria ed in particolare sugli effetti dei prodotti della combustione, sia nei confronti della struttura della galleria, sia a riguardo degli utenti e soccorritori in genere.

La memoria illustra il resoconto delle temperature raggiunte all'interno della galleria stradale durante la prova a fuoco che è stata articolata in due incendi distinti (uno di idrocarburi e l'altro di materiali solidi combustibili vari ed idrocarburi), mentre per quanto concerne gli altri parametri rilevati (termofisici e qualità dell'aria) si rimanda alla pubblicazione intitolata *Prova a fuoco in galleria stradale* redatta a cura del Corpo nazionale dei vigili del fuoco di concerto con il Dipartimento di Energetica del politecnico di Torino e la Società Autostrada, contenente anche il documentario della prova a fuoco su CD-Rom, ivi compreso l'andamento dei fumi dalla loro genesi fino all'uscita dalla galleria.

1. FINALITA' DELLA PROVA A FUOCO

La prova a fuoco è stata progettata, organizzata e realizzata con il duplice scopo di analizzare i valori dei parametri caratteristici dell'evoluzione di un evento di incendio e del microclima da esso indotto all'interno di una galleria stradale e successivamente di valutare l'efficienza dei sistemi e delle procedure di rilevazione, gestione e contenimento dell'evento.

Quanto sopra al fine di raccogliere informazioni e fornire suggerimenti tecnici che possano consentire di ridurre il rischio di incendio all'interno delle gallerie stradali.

La prova a fuoco è stata articolata in due successivi incendi caratterizzati da due differenti tipi di focolai.

Il primo incendio, di idrocarburi, è stato concepito come un evento controllato allo scopo di misurare ed acquisire l'evoluzione dei principali parametri termofisici caratteristici dell'incendio quali:

- il tasso di combustione
- la distribuzione di temperatura all'interno della galleria
- le variazioni di pressione indotte.

Essa inoltre ha permesso di:

- verificare l'affidabilità dei sistemi di rilevazione antincendio
- caratterizzare la qualità dell'aria nella galleria misurando l'opacità e la composizione dei prodotti della combustione
- visualizzare e registrare su supporti video e fotografici l'evoluzione dello strato dei fumi.

Il secondo incendio, di materiali solidi ed idrocarburi, mutuato dagli standard adottati nelle esercitazioni a fuoco dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, è stata realizzata in modo da:

- generare una curva di evoluzione della temperatura analoga alle curve temperatura-tempo in letteratura utilizzate per la verifica strutturale degli involucri delle gallerie;
- valutare l'efficienza dei sistemi di ricognizione, di gestione dei fumi e di contenimento del livello termico.

La prova a fuoco è stata svolta secondo le operazioni seguenti:

- posizionamento preliminare della strumentazione per il rilievo dei parametri di interesse ai fini della sperimentazione nei giorni precedenti l'esecuzione della prova a fuoco;
- predisposizione di un Servizio di sicurezza già in parte operativo nei giorni precedenti la prova;
- calibrazione della strumentazione mediante un piccolo focolaio di incendio realizzato la sera antecedente la prova;

- esecuzione della prova in data 11 dicembre 1999, realizzando, dapprima, l'incendio di idrocarburi, e successivamente quello dei materiali solidi combustibili vari ed idrocarburi.

Alle prove hanno partecipato alcune ditte specializzate nel campo antincendio, che hanno messo a disposizione attrezzature, materiali e dispositivi, idonei a rilevare e localizzare le sorgenti di incendio, a guidare gli addetti alle operazioni di soccorso ed estinzione, ad individuare la posizione degli utenti in pericolo, a stimare, attraverso la mappatura del campo termico fornito dalle termocamere, l'effettiva estensione dell'incendio, a contrastare ed indirizzare il moto dei fumi, a contenere la generazione dei prodotti della combustione ed a ridurre gli effetti termici tanto sul focolaio quanto sulle strutture.

2 PREPARAZIONE DELLA PROVA A FUOCO

2.1 Descrizione del sito

La galleria stradale dismessa "Colli Berici", utilizzata per la prova a fuoco, è posizionata lungo l'asse viario Milano-Venezia dell'autostrada A4, tra le uscite dei caselli di Vicenza Est e Vicenza Ovest, il cui esercizio è affidato alla Società Autostrada PD-BS S.p.A.

E' una galleria a doppio fornice dotata di tre by-pass equispaziati in direzione longitudinale. Al fine di rendere più gravose le condizioni di svolgimento sia dell'esercitazione del 19 giugno 1999 che della prova a fuoco, i tre by-pass sono stati murati realizzando una netta separazione fra le due canne.

Il punto per la realizzazione dei focolai dei due incendi è stato posizionato in prossimità del by-pass centrale, posto in corrispondenza della mezzeria longitudinale della galleria.

Le principali caratteristiche geometriche della galleria entro la quale sono state condotte le prove sperimentali sono riportate nella tabella 1.

Lunghezza	L	550 m
larghezza piano stradale	W	9,46 m (*)
raggio della volta	R	4,93 m
altezza in chiave di volta	H	6,36 m

(*) la larghezza indicata comprende due marciapiedi ciascuno di larghezza pari a metri 1,0

Tab. 1 Caratteristiche geometriche della galleria

La geometria della generica sezione trasversale della galleria è riportata nel dettaglio in figura 1, mentre longitudinalmente la galleria è ad asse rettilineo, presentando una modesta pendenza pari a circa lo 0,2 % crescente in direzione di Vicenza Ovest.

Dal punto di vista strutturale la galleria è realizzata con una volta in calcestruzzo armato gettato controparete in fase di scavo. Il calcestruzzo appare in cattive condizioni di conservazione con frequenti e profonde zone di distacco superficiale che tuttavia non scoprono le armature, mentre si rilevano altresì zone puntuali di infiltrazione di acque meteoriche.

2.2 Descrizione delle condizioni meteorologiche

A seguito dell'analisi condotta sui dati resi disponibili dal Centro Meteorologico di Teolo dell'A.R.P.A. del Veneto è risultato che nelle ore centrali del giorno 11 dicembre 1999 l'area comprendente la galleria stradale denominata "Colli Berici" è stata interessata da un buon soleggiamento e da vento debole (avente al più le caratteristiche di una "brezza leggera"). Pertanto, pur essendo le condizioni generali dell'atmosfera prossime alla neutralità tanto da non favorire né contrastare la dispersione degli inquinanti emessi al suolo, è stato ritenuto che il riscaldamento dei bassi strati, indotto dalla radiazione solare, abbia prodotto localmente condizioni di dispersione verticale, che è stata accentuate in presenza di fumi con temperatura superiore a quella dell'aria circostante, mentre la dispersione in orizzontale è stata limitata per la debole velocità del vento, nonché attenuata ulteriormente dopo le ore 12.00 dall'effetto barriera dovuto alla presenza dei Colli Berici.

2.3 Descrizione dei focolai

I materiali impiegati e le caratteristiche fisico-chimiche e geometriche dei focolai predisposti per l'esecuzione di ciascuna delle due prove sono sintetizzati nella tabella 2:

		Primo incendio	Secondo incendio
Sorgente:	Materiali	Benzina: 60 l Gasolio: 30 l Acqua: 45 l	Benzina: 140 l Pneumatici auto: 12 pz. Pneumatici autotreno: 1 pz. Pianali in legno: 12 pz. Materassi: 4 pz.
	Dimensioni	Diametro: 1,2 m	Diametro medio: 3 m
Potenza generata stimata		2 – 2.5 MW	4.5 – 5.5 MW
Temperatura massima stimata		420 °C	750 °C
Durata stimata		20 minuti	30 minuti

Tab. 2 Descrizione dei focolai

2.4 Descrizione della catena di misura per il rilievo della temperatura

Il rilevamento delle temperature nella galleria durante la prova a fuoco è stato effettuato da personale ed apparecchiature del Laboratorio di Scienza delle Costruzioni del Centro Studi ed Esperienze del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. L'importanza della temperatura per tutte le valutazioni seguenti la prova a fuoco, concernenti la generazione della curva temperatura-tempo caratteristica dell'incendio e la determinazione delle sollecitazioni termiche agenti sulla struttura, ha portato ad installare il maggior numero possibile di sonde termometriche, compatibilmente con le disponibilità organizzative.

Sono state individuate 5 stazioni di misura lungo l'asse della galleria ove effettuare il rilevamento del campo di temperatura, denominate A, B, C, D, E. Fissata la posizione dei focolai per entrambi gli incendi, esse sono state distribuite come sintetizzato nella tabella 3. Le distanze indicate con il segno negativo si intendono riferite alle stazioni posizionate in direzione Vicenza Ovest, mentre le distanze indicate con il segno positivo sono relative alle stazioni posizionate in direzione Vicenza Est.

Stazione	Distanza dal focolaio	Numero di sonde
A	-50 m	5
B	-20 m	12
C	0	26
D	+20 m	12
E	+50 m	5

Tab. 2 Disposizione delle termocoppie

Ciascuna stazione di misura comprende diverse sonde termometriche distribuite nel piano ortogonale all'asse longitudinale della galleria. Il numero e la posizione delle sonde in ciascun piano è stato dettato dall'esigenza di avere informazioni a diverse quote rispetto al piano stradale infittendone il numero laddove si riteneva presumibile rilevare variazioni significative del campo di temperatura.

Le sonde termometriche utilizzate, in numero complessivo pari a 60, sono termocoppie tipo K (nichel/cromo – nichel/alluminio) con fili di diametro 1,016 mm in guaina ceramica in corrispondenza del focolaio, e con fili di diametro 0,5 mm in calza di elettrovetro nelle restanti stazioni. Le termocoppie sono state appese alla volta tramite ganci ad anello tipo Fischer ancorati al calcestruzzo costituente il rivestimento della galleria. Il giunto caldo di ciascuna termocoppia è stato posizionato ad una prefissata quota dal piano stradale, mentre il giunto freddo è stato rinviato ad una postazione di acquisizione dati attraverso una serie di cavi compensati raccolti lungo un percorso murario appositamente predisposto. I cavi compensati, per i quali era stato ipotizzato l'attraversamento di zone in cui sarebbe stato possibile il raggiungimento di alte temperature, che avrebbero comportato, a loro volta, possibili disturbi al segnale elettrico, sono stati protetti avvolgendoli in 40 mm di lana di roccia e nastro isolante argentato. Allo stesso modo i connettori tra termocoppie e cavi compensati sono stati avvolti in una maglia di 5 mm di fibra ceramica, lana di roccia e nastro argentato. I cavi compensati, complessivamente in numero di 60, attraversanti il muro divisorio tra galleria e by-pass, sono stato collocati in appositi vani sigillati con lana ceramica sciolta pressata e, quindi, raccolti alla postazione di acquisizione dei dati.

Uno schema del sistema di rilevazione delle temperature è riportato nella figura 2, 3, 4, 5.

La postazione di acquisizione dati, collocata all'interno del by-pass funzionante come stazione sperimentale, era composta da un data logger multi-channel da 128 canali di cui 96 disponibili per termocoppie tipo k, un pannello porta connettori standard ad innesto rapido, un personal computer comprensivo di monitor e stampante ed uno stabilizzatore di tensione, il tutto racchiuso in un rack metallico di tipo industriale mobile su ruote pivotanti. L'acquisizione è stata effettuata utilizzando un software di gestione dati che, predisposto per le prove di resistenza al fuoco, è stato adattato per l'occorrenza alla prova a fuoco in galleria stradale, fissando il tempo di acquisizione pari a 10 s.

La preparazione delle termocoppie e dei cavi compensati è stata effettuata, preliminarmente, presso il Laboratorio di Scienza delle Costruzioni del Centro Studi ed Esperienze, mentre le operazioni di fissaggio e protezione delle termocoppie, e di stendimento e protezione dei cavi compensati in galleria nei due giorni antecedenti la prova. Prima dell'inizio della prova a fuoco tutte le termocoppie ed i relativi collegamenti sono stati sottoposti alla verifica della continuità elettrica attraverso un calibratore portatile monocanale.

3 SERVIZIO DI SICUREZZA

Per salvaguardare la sicurezza del personale intervenuto a vario titolo per lo svolgimento della prova a fuoco è stato predisposto un Servizio di sicurezza con i seguenti compiti:

- evitare che il fumo prodotto dagli incendi potesse creare disagio alle zone limitrofe ed, in particolare, al traffico autostradale adiacente;
- salvaguardare l'incolumità del personale VF addetto alla realizzazione degli incendi e allo svolgimento della prova a fuoco;
- estinguere gli incendi che, per ragioni di sicurezza, non consentissero lo svolgimento di uno o di entrambi gli incendi della prova a fuoco.

Il Servizio di sicurezza è risultato costituito, come risulta dalla tabella 4, da 123 uomini e 56 mezzi degli enti di seguito riportati, dislocati sia all'esterno che all'interno della galleria stradale come riportato nella figura 6:

- Ispettorato interregionale vigili del fuoco per il Veneto e Trentino Alto Adige;
- Comandi provinciali vigili del fuoco della regione Veneto;
- Corpo permanente vigili del fuoco di Bolzano;
- Polizia Stradale di Vicenza;
- SUEM 118 di Vicenza;
- C.R.I. di Vicenza;
- Dipartimento provinciale A.R.P.A.V. di Vicenza;
- Società Autostrada PD-BS S.p.A.

Inoltre, nel *Documento di impianto della prova a fuoco*, appositamente predisposto, è stato affidato al funzionario della Polizia Stradale l'incarico di disporre l'interruzione della prova a fuoco ed eventualmente di chiudere il traffico autostradale sul tratto interessato, nel caso in cui i fumi prodotti dagli incendi pregiudichino la sicurezza del traffico dell'adiacente autostrada A4.

ELENCO RISORSE IMPIEGATE NELLA PROVA A FUOCO			
ENTE	UOMINI	MEZZI	ATTREZZATURE
C.N.VV.F.	80	37	3
Politecnico di Torino	4	2	0
Società Autostrada	10	5	0
Polstrada	4	2	0
S.U.E.M. 188	4	1	0
C.R.I.	4	1	0
A.R.P.A.V.	2	1	2
Ditte esterne	15	7	4
TOTALE	123	56	9

Tab. 4 Servizio di sicurezza

Preventivamente, sono stati allertati a cura del SUEM 118 di Vicenza i Centri grandi ustionati degli ospedali di Mestre (VE) e Verona, mentre un elicottero del Nucleo elicotteri dell'Ispettorato interregionale vigili del fuoco per il Veneto e Trentino Alto Adige è pronto all'esterno della galleria sul lato Ovest per l'immediata ospedalizzazione di eventuali infortunati.

La direzione della prova a fuoco è stata assunta da un funzionario tecnico dell'Ispettorato interregionale vigili del fuoco per il Veneto e Trentino Alto Adige, che si è coordinato con i responsabili del Servizio di sicurezza, del Laboratorio di Scienze delle Costruzioni del Centro Studi ed Esperienze del Corpo nazionale dei vigili del fuoco e del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, come risulta riportato nell'organigramma in figura 7.

Il Servizio di sicurezza è stato affidato ad un funzionario tecnico del Comando provinciale vigili del fuoco di Vicenza che, oltre a coordinarsi con il direttore della prova a fuoco e con i responsabili degli altri enti facenti parte del medesimo Servizio di sicurezza, ha curato la direzione delle risorse dei vigili del fuoco facenti capo ai Coordinatori vigili del fuoco dislocati sul lato Est e sul lato Ovest della galleria stradale.

Il furgone "Sala operativa mobile" del Comando provinciale vigili del fuoco di Venezia, posizionato sul lato Est dell'imboccatura della galleria stradale, ha svolto la funzione di Sala operativa del Servizio di sicurezza.

4 PROGETTAZIONE TEORICA DEL PRIMO INCENDIO

Il primo incendio è stato progettato al fine di seguire tutte le fasi caratteristiche dell'evoluzione dell'evento realizzando condizioni ambientali idonee ad un corretto funzionamento dei dispositivi di misura installati in prossimità del focolaio per l'intera durata della prova garantendo al contempo la sicurezza degli operatori addetti alle riprese.

Essendo le dimensioni caratteristiche di un qualsiasi incendio determinate dalle dimensioni geometriche della sorgente, che nel caso di incendio di autovettura possono essere stimate pari a 6 m² di area in pianta e 10 m di perimetro, il primo incendio controllato è stato progettato per riprodurre la potenza associata all'evento reale considerato, in genere pari a 2.5 MW con una quantità di fumi da esso prodotti pari a 20 m³/s, utilizzando invece un focolaio di dimensioni ridotte pari a 1.13 m² di area in pianta e 3.77 m di perimetro, realizzato con idrocarburi quali benzina e gasolio aventi un potere calorifico maggiore dei materiali tipici dell'industria automobilistica.

A tal fine sono stati, preliminarmente, stimati e previsti, limitatamente per il primo incendio, i seguenti parametri che sono riportati più dettagliatamente nella pubblicazione *Prova a fuoco in galleria stradale*:

- il tasso di combustione di un idrocarburo;
- la potenza termica generata e la portata dei fumi prodotti;
- la qualità dell'aria all'interno della galleria;
- la simulazione numerica con il modello a zone e di campo.

5 RISULTATI DELLA PROVA

5.1 Rilievi di temperatura

Nelle figure 2, 3, 4 e 5, come già detto, sono riportate le posizioni e la numerazione delle termocoppie impiegate nei due incendi prodotti.

Le termocoppie n. 32 e n. 59 nel corso del primo evento di incendio della prova a fuoco hanno manifestato un malfunzionamento per cui sono state disattivate, mentre tutte le restanti termocoppie, nel corso del secondo evento di incendio, hanno restituito un segnale fortemente disturbato da un rumore di fondo (forse dovuto a qualche danno di natura elettrica provocato dal primo evento di incendio) eliminato a posteriori con una operazione di filtraggio dei dati.

In ambedue gli eventi di incendio le termocoppie hanno rilevato una lieve asimmetria nel riscaldamento dell'ambiente. Più precisamente in tutte le stazioni di misura, a parità di altezza dal piano stradale, le termocoppie poste sul lato di innesto dei by-pass hanno registrato una temperatura generalmente più bassa di quelle posizionate sul lato opposto. Queste differenze dovute a probabili asimmetrie nella geometria della galleria o nelle condizioni di ventilazione vengono trascurate nelle considerazioni che seguono, stante la modesta entità del fenomeno riscontrato.

Di seguito sono stati riportati i diagrammi tempo-temperatura relativi alle diverse stazioni di misura per ciascuna simulazione di incendio. In ogni stazione di misura i dati delle termocoppie relative ad una specifica quota sono stati mediati tra di loro in modo da ottenere diverse curve ciascuna rappresentativa della temperatura ad una specifica quota dal piano stradale. Da queste medie rimangono escluse quelle termocoppie che, per malfunzionamento o per andamento anomalo della temperatura, si discostano eccessivamente dalla temperatura media delle altre termocoppie poste alla stessa quota. Ad esempio nella stazione C, in cui è posizionato il focolaio, alcune termocoppie vengono investite direttamente dalle fiamme e rilevano temperature fortemente discordanti dalle altre alla stessa quota che rilevano invece la temperatura dei gas caldi, e, pertanto, per questo motivo dette termocoppie non entrano nella media della temperatura alla quota cui sono posizionate, ma vengono diagrammate a parte. Si tratta della termocoppia 11 per il primo evento di incendio e delle termocoppie 11, 12 e 13 per il secondo evento di incendio.

5.1.1 Rilievi della temperatura del primo incendio

Il grafico 1 riporta l'andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia 11 posizionata sopra il focolaio a 0,70 m dalla sommità del contenitore. Come già detto il valore della temperatura rilevata da questa termocoppia (~ 430 °C) è notevolmente più alto del massimo valore di temperatura (~ 100 °C) rilevato da tutte le altre. L'andamento della temperatura nella fase crescente è caratterizzato da un tratto sub-orizzontale tra il 4° e il 7° minuto di incendio causato da una transitoria variazione delle condizioni di ventilazione naturale che hanno inclinato fortemente la direzione delle fiamme allontanandole dalla termocoppia. La temperatura raggiunge il massimo valore dopo ~ 11 minuti di incendio dopo di che inizia un rapido raffreddamento caratterizzato nella fase conclusiva da un repentino e isolato picco di temperatura certamente causato dall'attivazione del motoventilatore. Dopo il 25° minuto si ritorna lentamente nelle condizioni iniziali ($T < 25$ °C) e al 30° minuto si interrompe l'acquisizione.

Il grafico 2 riporta l'andamento della temperatura rilevata alle diverse quote nella stazione di misura C. Le temperature risentono in misura minore dell'orientamento delle fiamme (con eccezione delle temperature a quota 3,00 m dalla quota del piano stradale) e in maniera attendibile rilevano la temperatura dei gas caldi che si stratificano verso l'alto con l'attesa crescita della temperatura negli strati più alti e valore massimo in chiave di volta.

I grafici 3 e 4 riportano l'andamento della temperature rilevate alle diverse quote rispettivamente nelle stazioni di misura B e A. Da notare in entrambi i casi il ritardo dell'inizio del riscaldamento rispetto alla stazione C (stimabile in circa 1 minuto per la stazione B e circa 2 minuti per la stazione A) che permette di avere un'idea della velocità di movimento degli effluenti nella direzione Est-Ovest (circa 20-25 m/minuto). Comune ad entrambi i casi è il modesto riscaldamento rilevato alla quota di 4,40 e 4,25 m dal piano stradale (~ 30 °C), rispetto alle temperature rilevate in chiave di volta (~ 65 °C per la stazione B e ~ 55 °C per la stazione A). Da questo si può dedurre che il posizionamento del piano neutro della stratificazione degli effluenti è presumibilmente compreso tra i 4,50 e i 5,00 m dal piano stradale. Ovviamente le temperature massime rilevate nella stazione B sono superiori a quelle rilevate nella stazione A più distante della precedente dal focolaio.

I grafici 5 e 6 riportano l'andamento della temperature rilevate alle diverse quote rispettivamente nelle stazioni di misura D ed E. In questo caso l'inizio del riscaldamento nella stazione D è in ritardo di circa 15 s rispetto la stazione C e l'inizio del riscaldamento in E è in ritardo di circa 30 s sempre rispetto a C. La velocità degli effluenti in direzione Ovest-Est è stimabile in circa 100 m/minuto. Dal confronto delle velocità è deducibile il della ventilazione naturale (Ovest-Est) che si sovrappone al moto naturale degli effluenti.

Anche in queste due stazioni si evidenzia il fenomeno di netta stratificazione degli effluenti con temperature decisamente più alte in chiave di volta (55 °C nella stazione D e 45 °C nella stazione E) rispetto alle temperature a quota di 4,40 e 4,25 m dal piano stradale (~ 30 °C).

Una importante ulteriore osservazione va fatta confrontando i grafici 3 e 4 rispettivamente con i grafici 5 e 6. Si nota infatti che nelle stazioni A e B le temperature raggiunte in chiave di volta sono superiori alle rispettive temperature raggiunte nelle stazioni D ed E (differenze di circa 10 °C). Infatti nelle stazioni A e B l'azione del vento, agente nel verso opposto al moto naturale degli effluenti, ne riduce la velocità con un ispessimento dello strato degli effluenti stessi tale da favorire il riscaldamento della volta. Al contrario nelle stazioni D ed E l'azione del vento, nello stesso verso del moto naturale degli effluenti, ne favorisce l'allontanamento con conseguente riduzione dello strato e relativa riduzione del riscaldamento.

5.1.2 Rilievi della temperatura del secondo incendio

Il grafico 7 riporta l'andamento delle temperature rilevate dalla termocoppia 11, 12 e 13 posizionate sopra il focolaio rispettivamente a 0,70 m, 2,00 m e 3,05 m sopra la sommità della catasta. Come già detto il valore della temperatura rilevata da queste termocoppie (tra 620 e 480 °C) è notevolmente più alto del massimo valore di temperatura (~ 260 °C) rilevato da tutte le altre.

L'andamento della temperatura nella prima fase è estremamente rapido con valori più bassi a quote più alte (cioè allontanandosi dalla fiamma); è caratterizzato da un tratto sub-orizzontale tra il 1° e il 5° minuto di incendio causato probabilmente da una transitoria variazione delle condizioni di ventilazione naturale. La temperatura subisce per le tre termocoppie e con uguale intensità un repentino innalzamento tra il 5° e il 6° minuto e un altrettanto repentino e consistente abbassamento tra il 6° e l'8° minuto dopo di che si assiste di nuovo tra l'8° e il 10° minuto ad un innalzamento a valori prossimi al picco precedente e ad un successivo abbassamento tra il 10° e il 12° minuto.

Successivamente la temperatura tende a mantenersi costante tra i 100 e i 150 °C fino al 20° minuto per poi repentinamente scendere ai valori di inizio prova; al 25° minuto si interrompe l'acquisizione. Detto andamento altalenante è probabilmente dovuto all'azione intermittente del motoventilatore mobile azionato dal 6° all'8° minuto e poi dal 10° al 20° minuto all'imbocco della galleria lato Est per limitare la fuoriuscita dei fumi che in questa simulazione sono stati particolarmente densi e consistenti. Chiaramente per le tre termocoppie investite direttamente dalle fiamme, l'azionamento (o lo spegnimento) del ventilatore che orienta radicalmente le fiamme, ne condiziona il valore di temperatura rilevato. Per tutte le altre termocoppie l'effetto della presenza del ventilatore è meno evidente ma comunque tale da incidere significativamente sulle temperature rilevate. Per questo motivo non si ritiene di formulare ulteriori considerazioni.

I grafici 8, 9, 10, 11 e 12 riportano l'andamento della temperature rilevate alle diverse quote rispettivamente nelle stazioni di misura C, B, A, D, E.

6 ATTREZZATURE E MATERIALI ANTINCENDI

6.1 Impiego delle termocamere

Durante la prova a fuoco sono state provate dai vigili del fuoco alcune termocamere ai raggi infrarossi di tipo portatile che hanno consentito per entrambi gli incendi la visibilità all'interno della galleria invasa dal fumo ed il rilievo sia della temperatura della volta della struttura della stessa galleria che della fiamma, con la possibilità di acquisire e trasferire in stazione remota le immagini, le temperature rilevate e la posizione dell'incendio.

Si ritiene che a seguito della esperienza effettuata le squadre di soccorso debbano essere dotate di tale tipo di attrezzatura sia nella versione portatile che fissa a bordo di un mezzo di soccorso.

6.2 Impiego del motoventilatore

La natura del focolaio del secondo incendio ha determinato la generazione di grandi quantità di fumi e di particolato che hanno ridotto tanto la vivibilità quanto la visibilità all'interno della struttura, costringendo il personale impegnato all'uso di autoprotettori.

L'attivazione del motoventilatore ha determinato una riduzione sensibile dei livelli di temperatura tanto all'interno della galleria quanto in prossimità del focolaio. L'avanzamento del motoventilatore all'interno della galleria ha prodotto una sostanziale fuoriuscita dei fumi, tale da consentire l'avvicinamento al focolaio degli operatori in condizioni di sicurezza.

6.3 Impiego di attrezzature per l'abbattimento dei fumi

Per ridurre la fuoriuscita dei fumi dalla galleria sono stati azionati dei sistemi di abbattimento dei fumi posti in prossimità di entrambi gli imbocchi alla galleria, costituiti da barriere d'acqua nebulizzata prodotta da diffusori a ventaglio collegati a manichette antincendio alimentate dalle autopompaserbatoio presenti sul posto.

Le cortine d'acqua hanno prodotto soltanto un modesto abbattimento dei fumi tanto da richiedere l'azionamento di altri dispositivi (monitore posto sullo snorkel, lance a terra e motoventilatore); inoltre,

hanno viziato la naturale uscita dei fumi dalla parte alta della galleria peggiorando le condizioni di visibilità all'interno della stessa.

7 CONCLUSIONI

7.1 Valutazioni finali della prova a fuoco

7.1.1 Primo incendio (focolaio di idrocarburi)

Il primo incendio ha consentito per la prima volta di filmare la formazione e l'avanzamento dello strato dei fumi all'interno della galleria a partire dal focolaio fino alla fuoriuscita dal portale est.

Le caratteristiche geometriche del focolaio e la sua potenza termica, stabilite in fase di progetto, hanno permesso il rilievo continuo della portata bruciata mediante l'impiego di strumenti convenzionali di misura. L'andamento misurato del tasso di combustione si è rivelato generalmente consono alle leggi teoriche usualmente adottate per la modellizzazione del fenomeno, ancorché si siano riscontrate parziali discrepanze attribuibili all'eterogeneità delle sostanze costituenti il focolaio.

La ridotta intensità del focolaio del primo incendio ha determinato un rapido raffreddamento dello strato dei fumi con conseguente ricaduta verso l'uscita della galleria sottovento. La ventilazione naturale della galleria determinata dalle condizioni barometriche ai portali non ha assicurato un flusso longitudinale di intensità sufficiente ad impedire il fenomeno del back-layering.

Le visualizzazioni e i rilievi di temperatura hanno consentito una stima della velocità di avanzamento del fronte dei fumi dalla quale è stato possibile desumere i tempi di riempimento della struttura. La valutazione accurata dei tempi di riempimento ha evidenziato il problema connesso ai tempi di intervento che risultano relativamente ristretti pur in presenza di un incendio di intensità ridotta.

La qualità dell'aria all'interno della galleria è risultata mediamente accettabile come risulta dal tenore di ossigeno rilevato nel corso della prova, mentre la visibilità è risultata compromessa a causa dell'abbassamento dello strato dei fumi indotto dal rapido decremento di temperatura lungo l'asse della galleria.

Il valore di velocità di avanzamento di un essere umano in presenza di una massa di fumi che riempia completamente la sezione trasversale di una galleria risulta pari a 0,5 m/s, definito un valore di attenuazione visiva pari a 0,2 m⁻¹, corrispondente ad una distanza di visibilità pari a 30 m. Quando si verificano tali condizioni in una galleria quale la Galleria Colli Berici, che, all'atto della prova risultava sprovvista di vie di fuga, il tempo di percorrenza di un tratto di lunghezza pari a metà della galleria stessa risulta di 550 s cioè maggiore di 9 min. La galleria è risultata invasa dai fumi dopo 7 minuti e dunque le condizioni createsi nel corso della prova possono essere considerate di sicurezza per gli occupanti. L'evento di incendio progettato, tuttavia, risulta caratterizzato da bassissima magnitudo: l'attenuazione visiva in condizioni reali, essendo funzione della potenza rilasciata e della portata di diluizione dei fumi, risulta in genere molto più elevata con conseguente drastica riduzione della distanza di visibilità e della velocità di avanzamento.

La bassa intensità dell'incendio non ha determinato una sopraelevazione di temperatura tale da provocare danni alla struttura neanche in corrispondenza del focolaio.

7.1.2 Secondo incendio (focolaio di materiali vari combustibili solidi e idrocarburi)

L'intensità del secondo incendio, classificabile di bassa potenza, ed il previsto impiego del motoventilatore non hanno consentito l'utilizzo del sistema di visualizzazione mobile dello strato dei fumi all'interno della galleria.

L'eterogeneità dei materiali costituenti il focolaio e l'estensione dello stesso non hanno permesso il rilievo del tasso di combustione. L'intensità del focolaio ha determinato una stratificazione accentuata dei fumi con conseguente permanenza degli stessi a ridosso della volta per un tratto di lunghezza considerevole della galleria. La ventilazione naturale della galleria determinata dalle condizioni barometriche ai portali non ha assicurato un flusso longitudinale di intensità sufficiente ad impedire il fenomeno del back-layering.

Le visualizzazioni e i rilievi di temperatura hanno consentito una stima della velocità di avanzamento del fronte dei fumi dalla quale è stato possibile desumere i tempi di riempimento della struttura.

La qualità dell'aria all'interno della galleria è risultata rapidamente deteriorata come risulta dal raggiungimento del fondo scala dei relativi strumenti installati, e la visibilità è risultata immediatamente compromessa anche a causa della presenza di rilevanti quantità di particolato dei fumi, così da rendere notevolmente ridotti sia i tempi di evacuazione che quelli di intervento.

Anche in questo caso l'intensità dell'incendio non ha determinato una sopraelevazione di temperatura tale da provocare danni alla struttura neanche in corrispondenza del focolaio.

7.2 Protocollo per l'effettuazione di prove a fuoco in galleria

L'esperienza acquisita con la prova a fuoco in questione consente di poter definire un protocollo per l'effettuazione di altre prove a fuoco secondo i punti di seguito riportati:

- 1) definizione dei focolai (dimensioni, tipologia e quantitativo dei materiali);
- 2) installazione delle seguenti apparecchiature e strumentazioni:
 - a) rilevatori di incendi;
 - b) reticoli di termocoppie per la mappatura del campo di temperatura;
 - c) radiometri e flussimetri per la determinazione degli scambi termici radiativi e convettivi;
 - d) sistemi di misura della massa bruciata;
 - e) analizzatori di gas e particolato;
 - f) anemometri e rilevatori di pressione all'interno e all'esterno della galleria;
 - g) sistemi per l'acquisizione e la gestione dei dati rilevati;
 - h) sistemi mobili e fissi, interni ed esterni alla galleria, per la visualizzazione e la registrazione della prova a fuoco su supporti video-fotografici;
 - i) sistemi di comunicazione all'interno della galleria;
- 3) predisposizione del servizio di sicurezza, della logistica e dei sistemi di comunicazione tra direttore della prova a fuoco, responsabile del servizio di sicurezza e responsabile dell'equipe di studio;
- 4) verifica dell'efficacia dei sistemi di ventilazione e di illuminazione in caso di incendio;
- 5) report cronologico della prova a fuoco;
- 6) relazione finale della prova a fuoco.

Ringraziamenti

Si ringraziano i funzionari del Corpo nazionale dei vigili del fuoco e dei Corpi permanenti di Bolzano e Trento che hanno fatto parte del gruppo di lavoro per la realizzazione della prova a fuoco, nonché dei seguenti Enti e Ditte che hanno preso parte alla prova a fuoco:

- *Prefettura di Vicenza;*
- *Polizia Stradale di Vicenza*
- *Dipartimento Provinciale di Vicenza dell'A.R.P.A. del Veneto;*
- *SUEM 118 di Vicenza*
- *Croce Rossa Italiana sezione di Vicenza*
- *BAI TECNICA*
- *BINI PIETRO & FIGLI S.r.l.*
- *EASY SYSTEMS S.r.l.*
- *FIRECO S.r.l.*
- *LAND INFRARED ITALIANA*
- *PEDROTTI ANTINCENDI S.a.s.*
- *SAI-Servizi Aerei Industriali S.r.l.*

Un particolare ringraziamento è rivolto alla Società Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova S.p.A. che ha promosso l'iniziativa per il miglioramento della sicurezza autostradale.

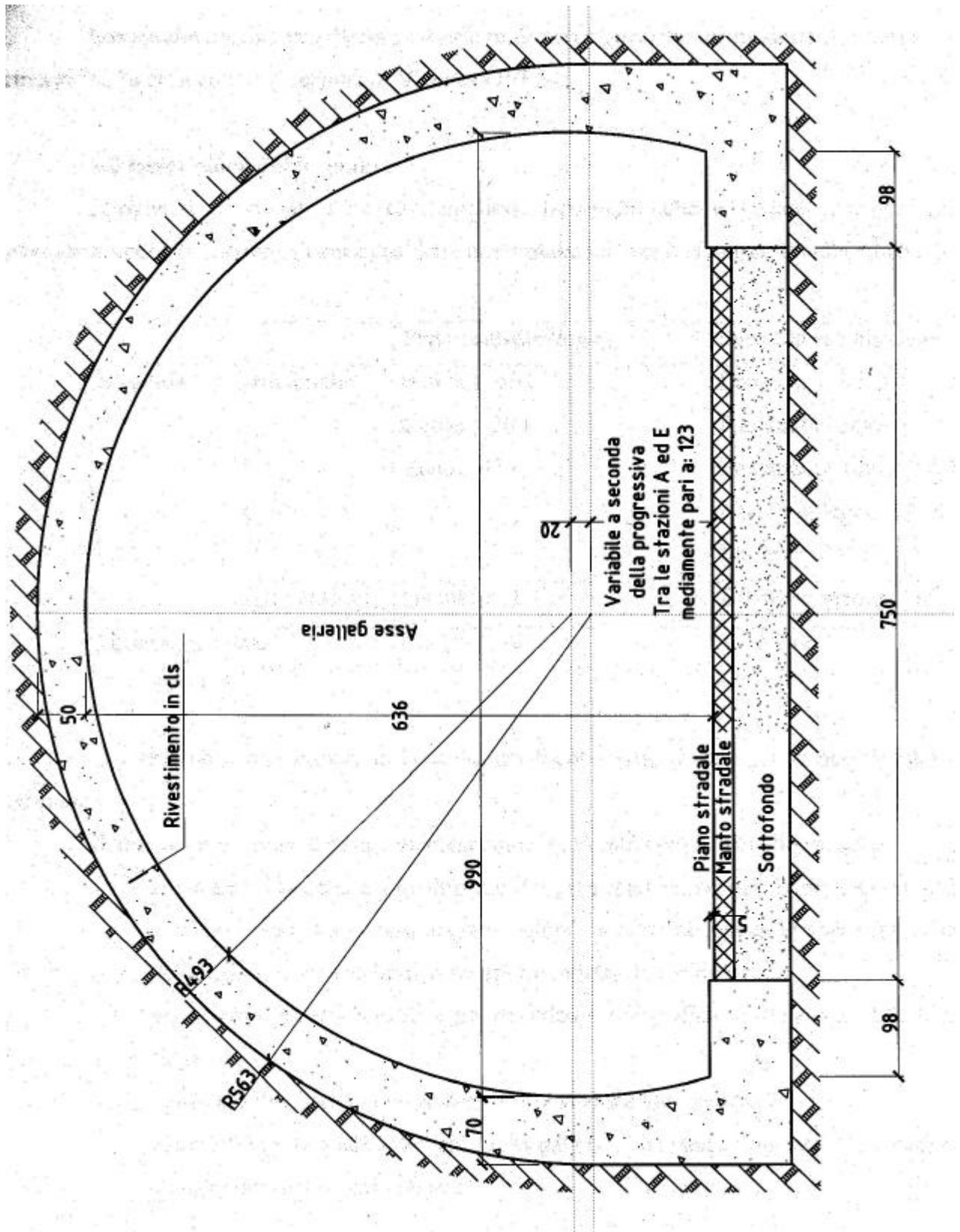


Fig. 1 Sezione tipo della galleria "Colli Berici"

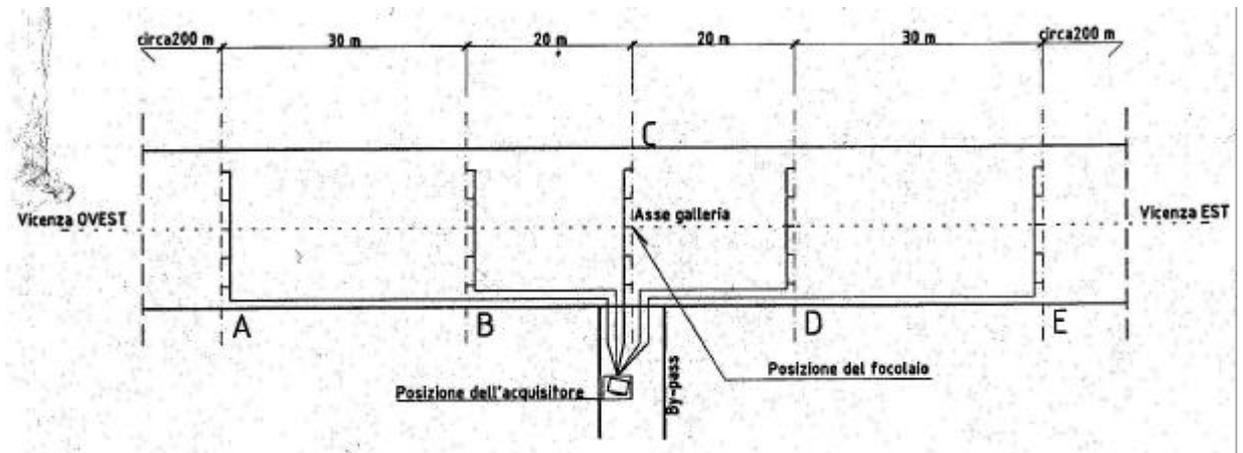


Fig. 2 Posizionamento delle termocoppie – Schema longitudinale

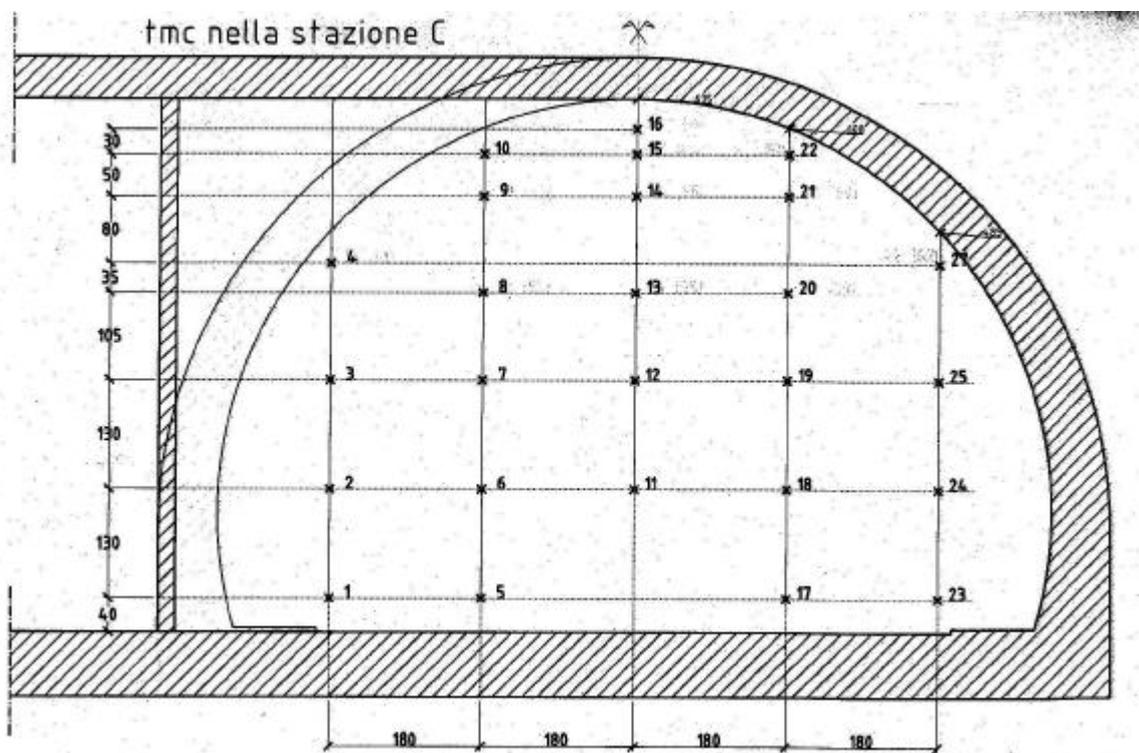


Fig. 3 Posizionamento termocoppie – Stazione di misura C (in prossimità del focotale)

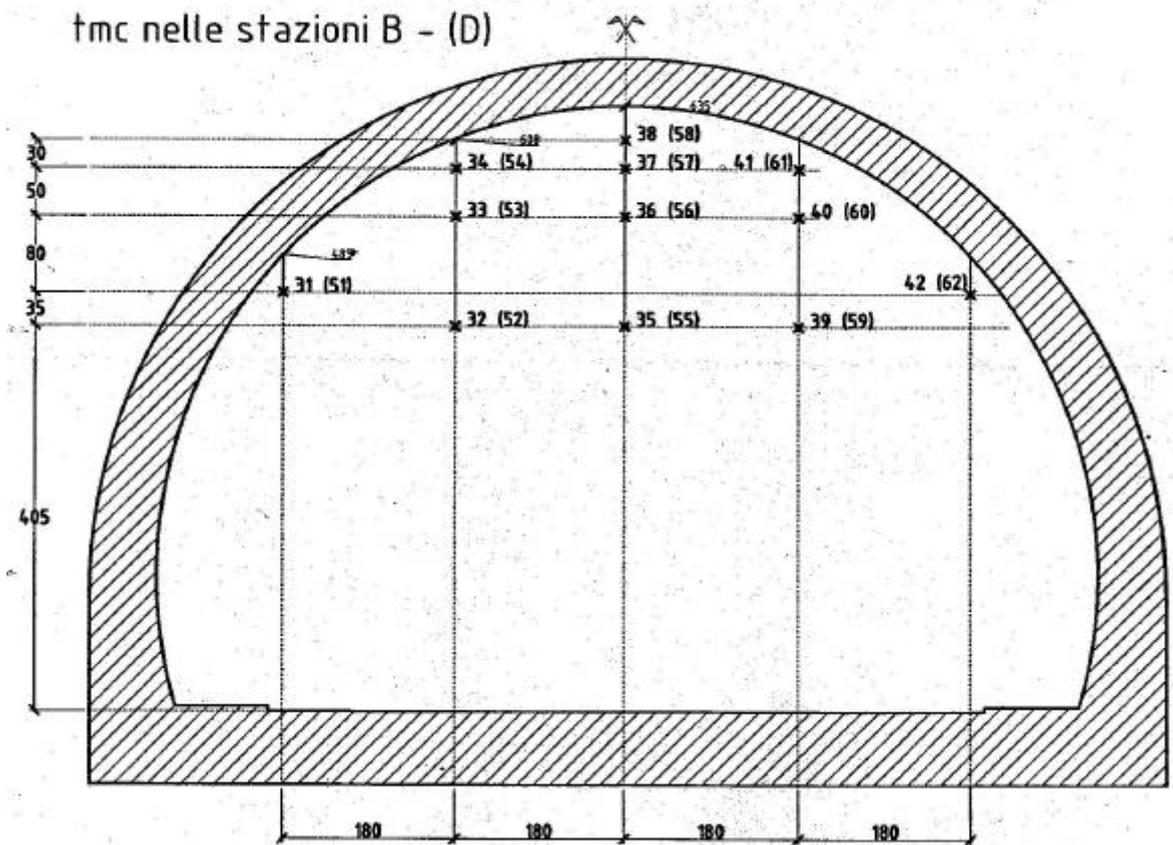


Fig. 4 Posizionamento termocoppie – Stazioni di misura B e D (a 20 m dal focolaio)

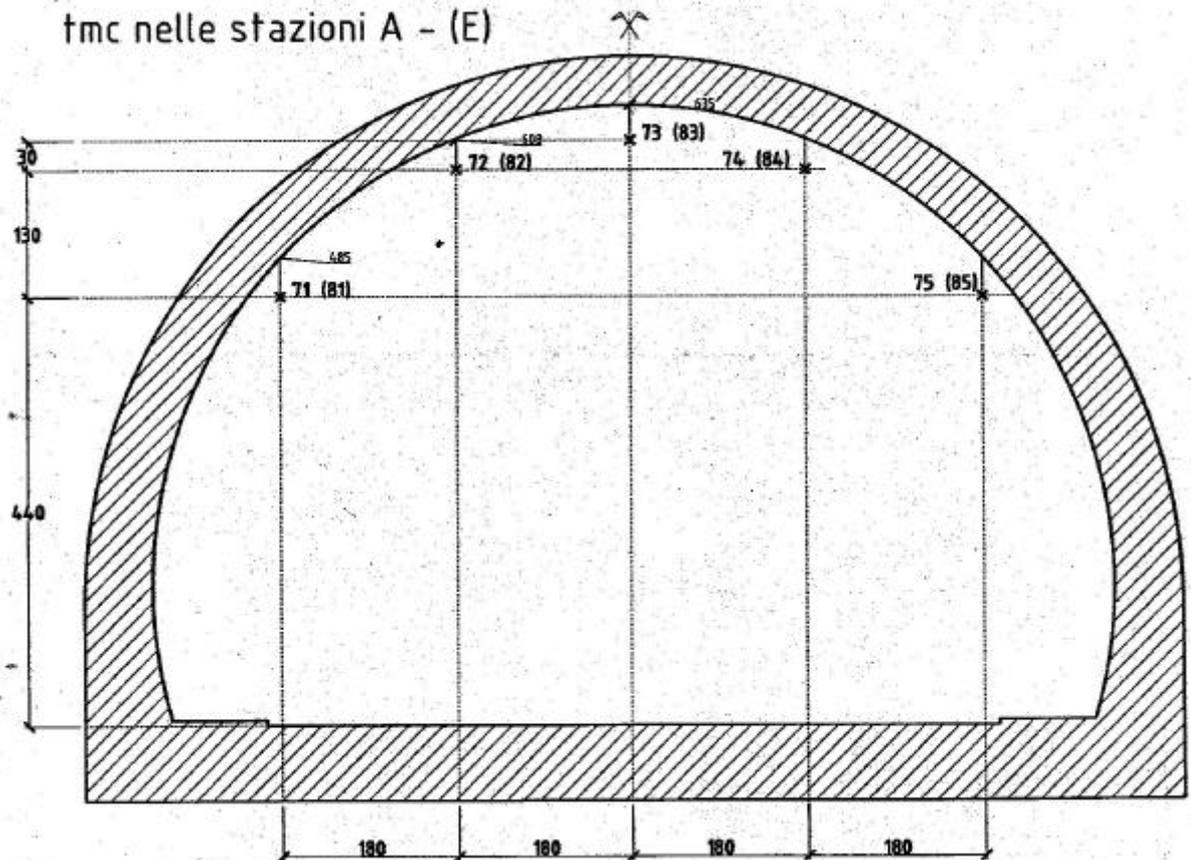


Fig. 5 Posizionamento termocoppie – Stazioni di misura A ed E (a 50 m dal focolaio)

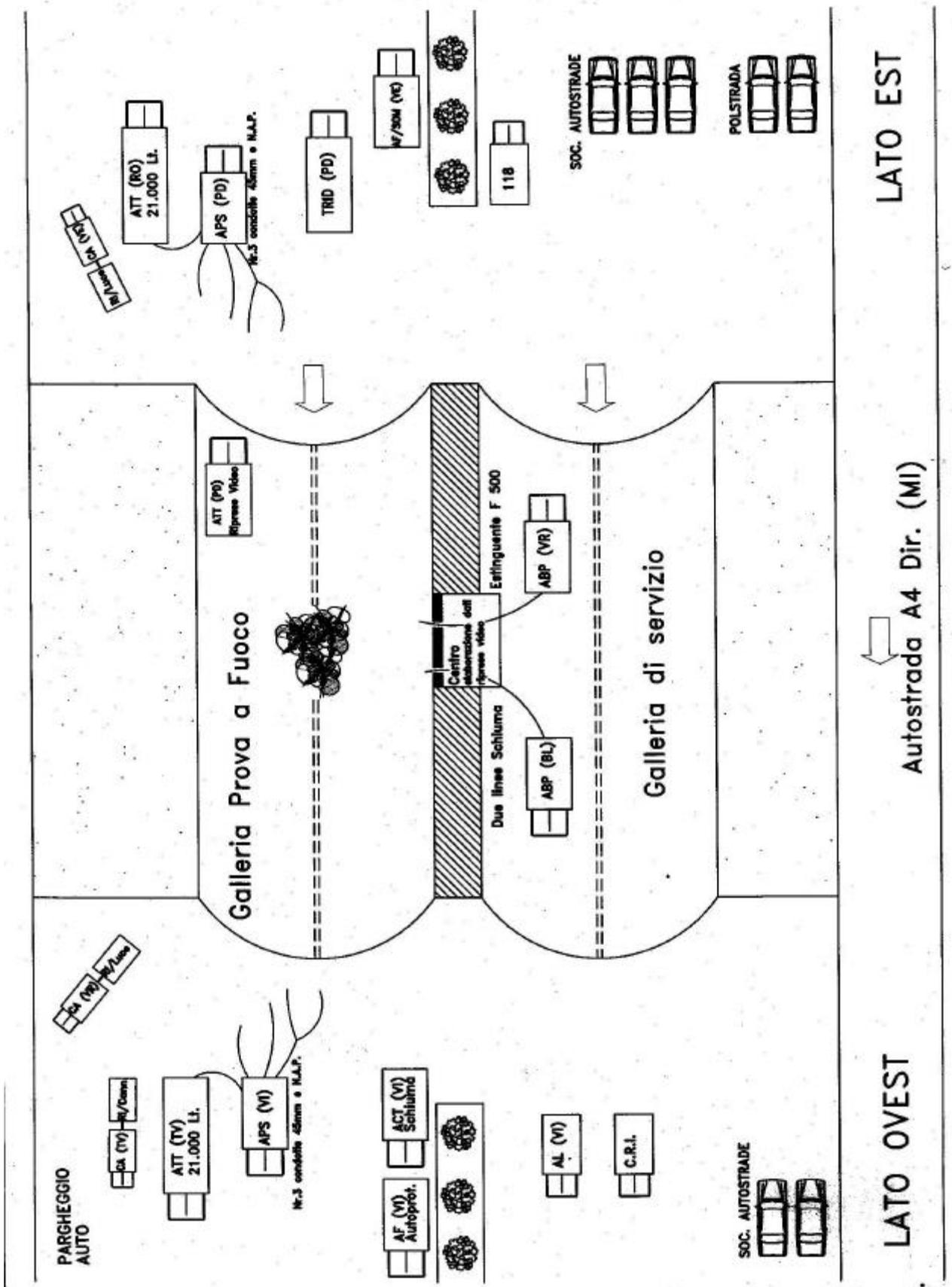


Fig. 6 Posizionamento del servizio di sicurezza

Organigramma coordinamento "Prova a fuoco"

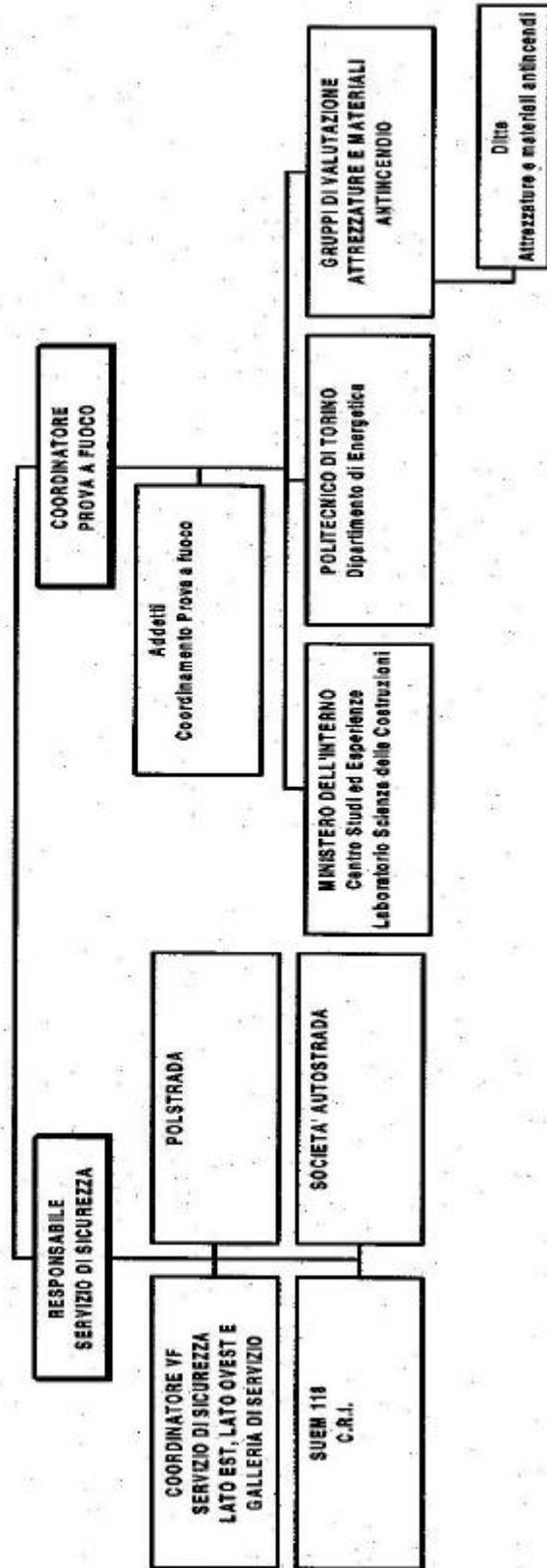


Fig. 7 Organigramma del servizio di sicurezza

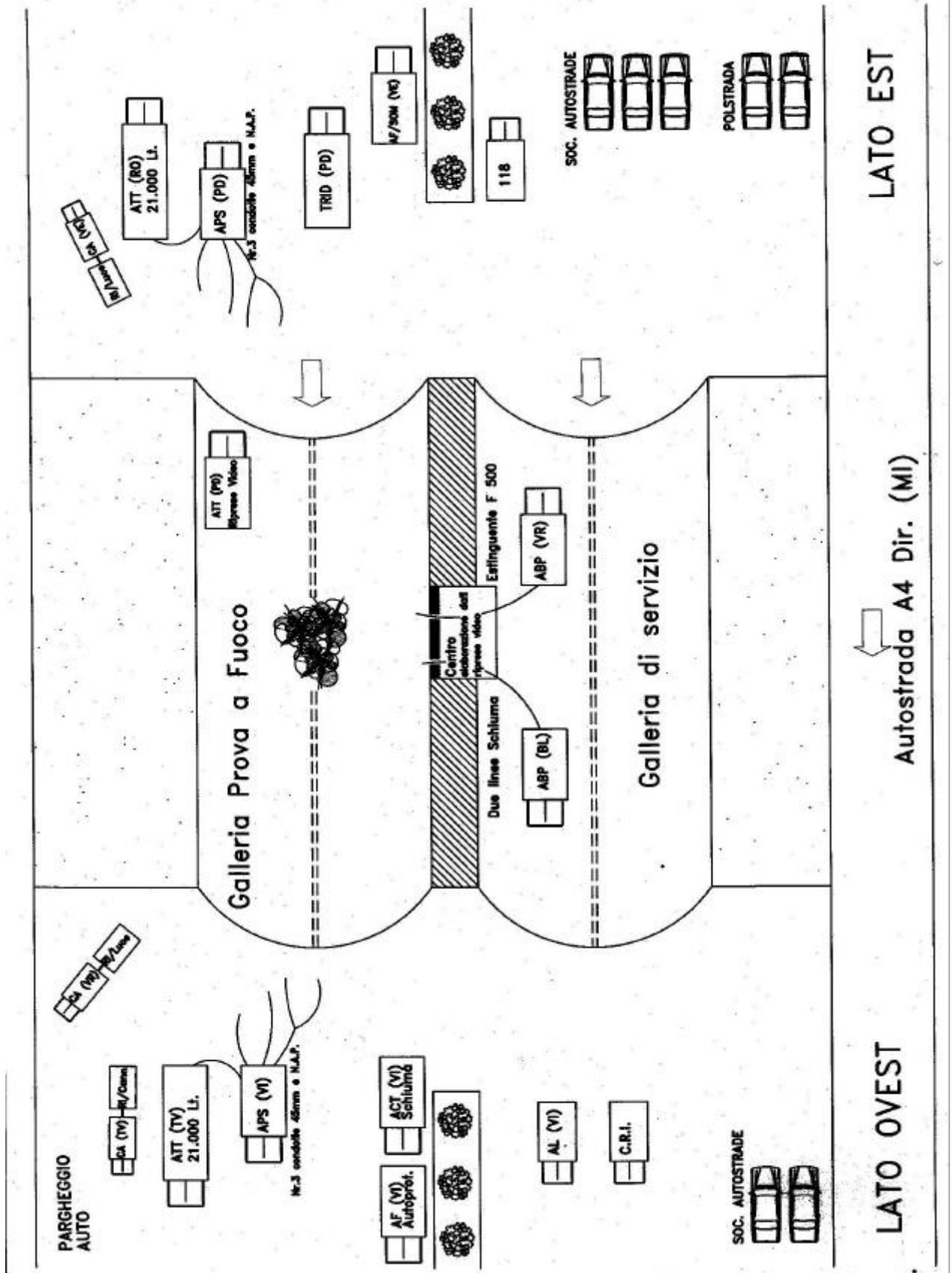


Fig. 8 Posizionamento del servizio di sicurezza

Organigramma coordinamento "Prova a fuoco"

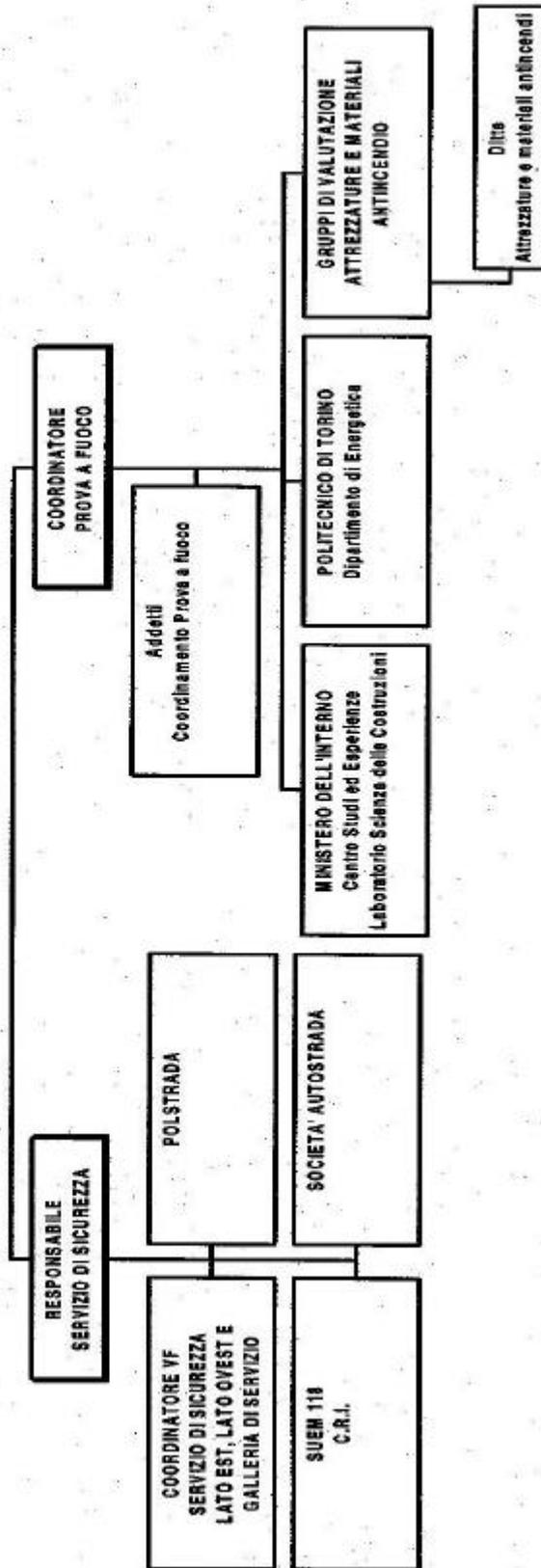
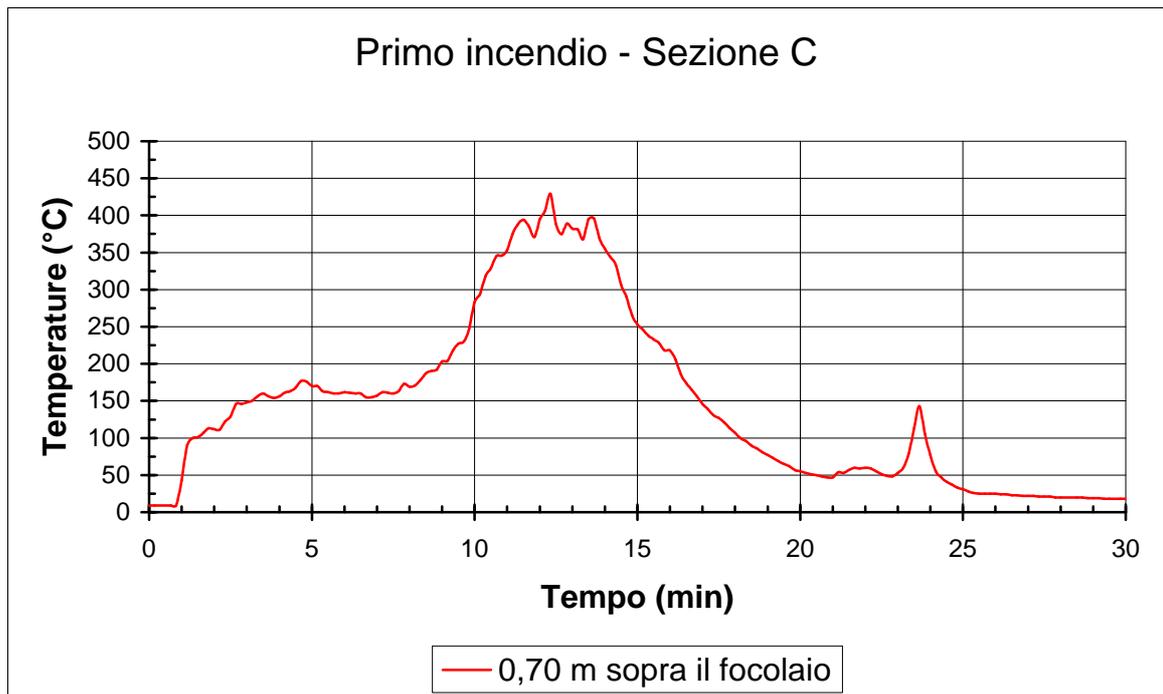
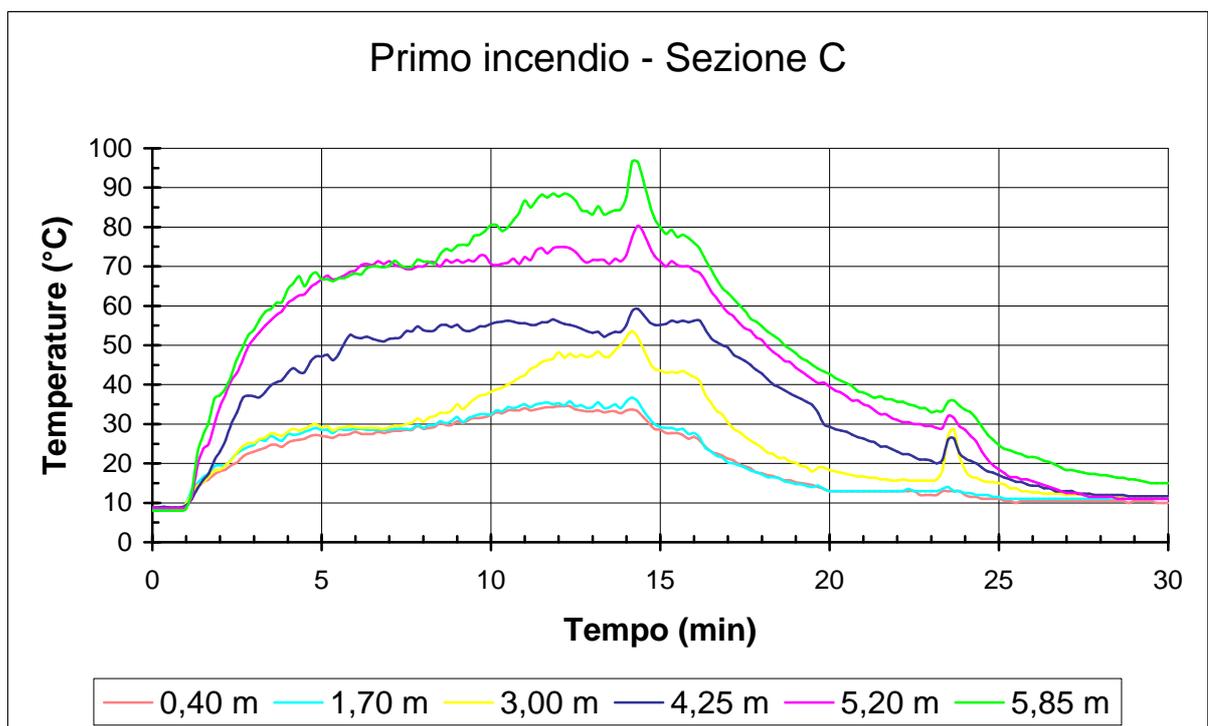


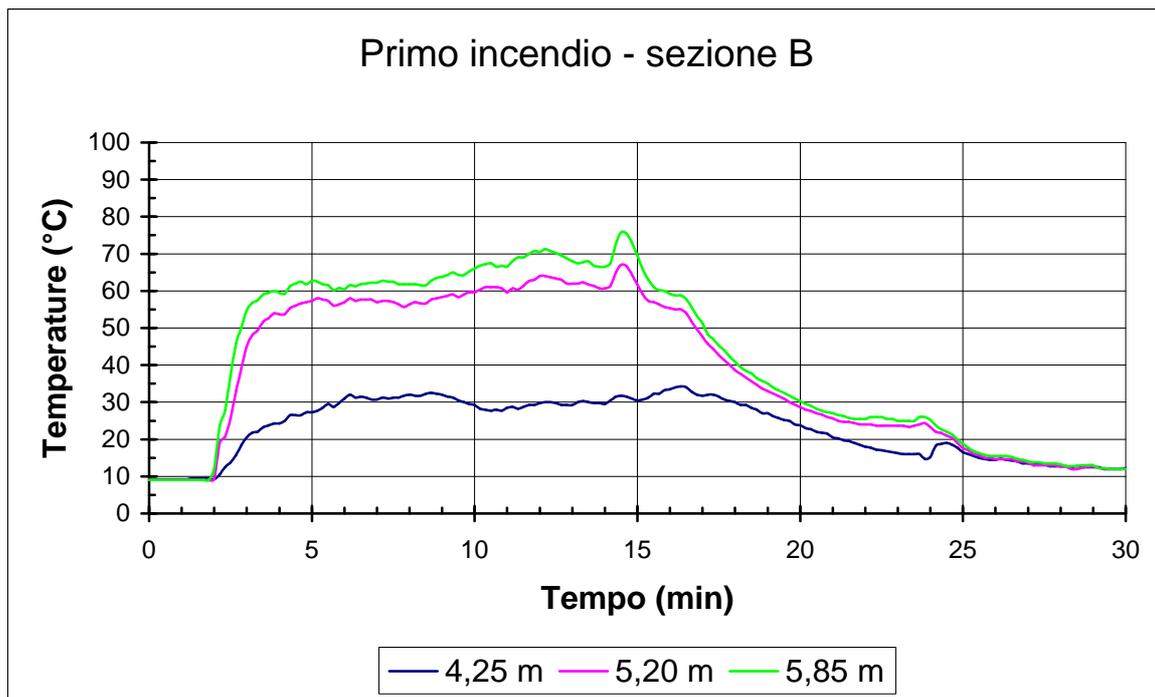
Fig. 9 Organigramma del servizio di sicurezza



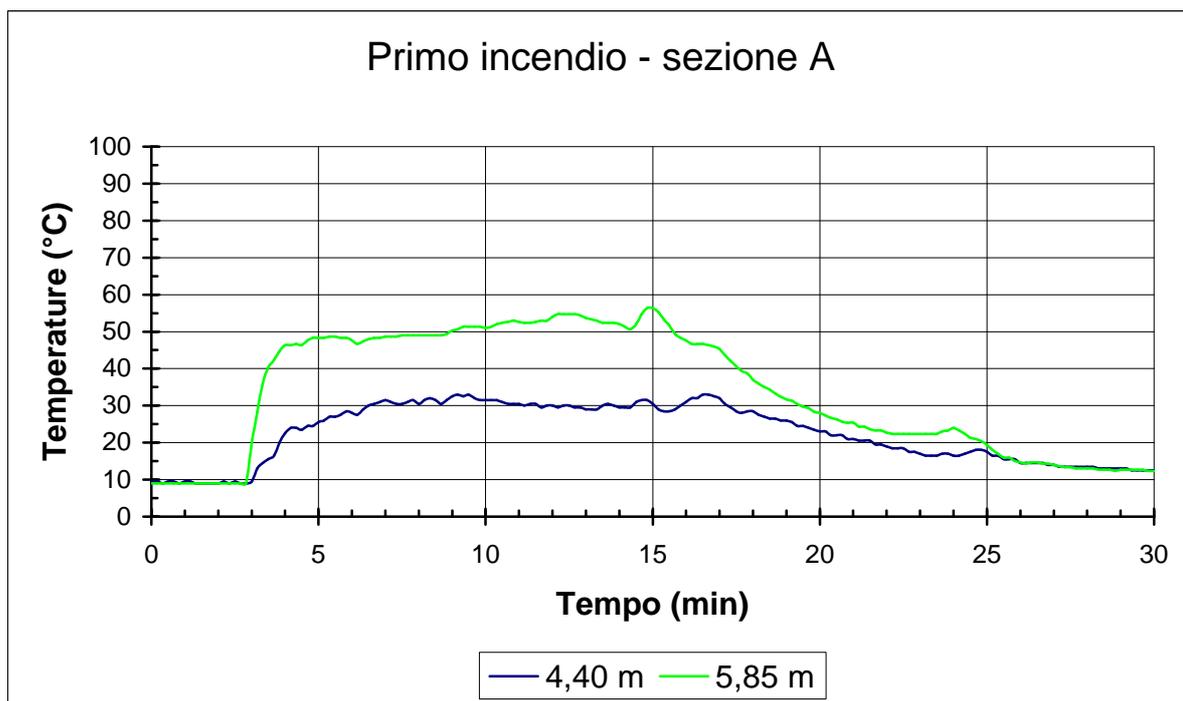
Graf. 1 Andamento della temperatura alla tmc 11 – Stazione C



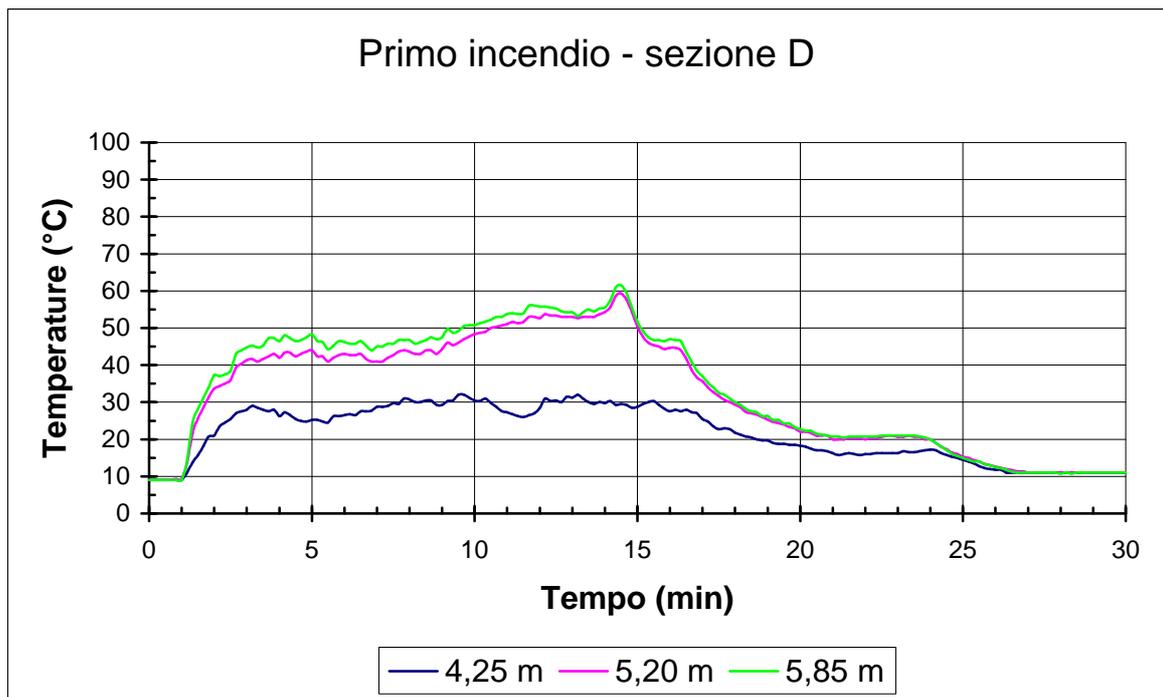
Graf. 2 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione C



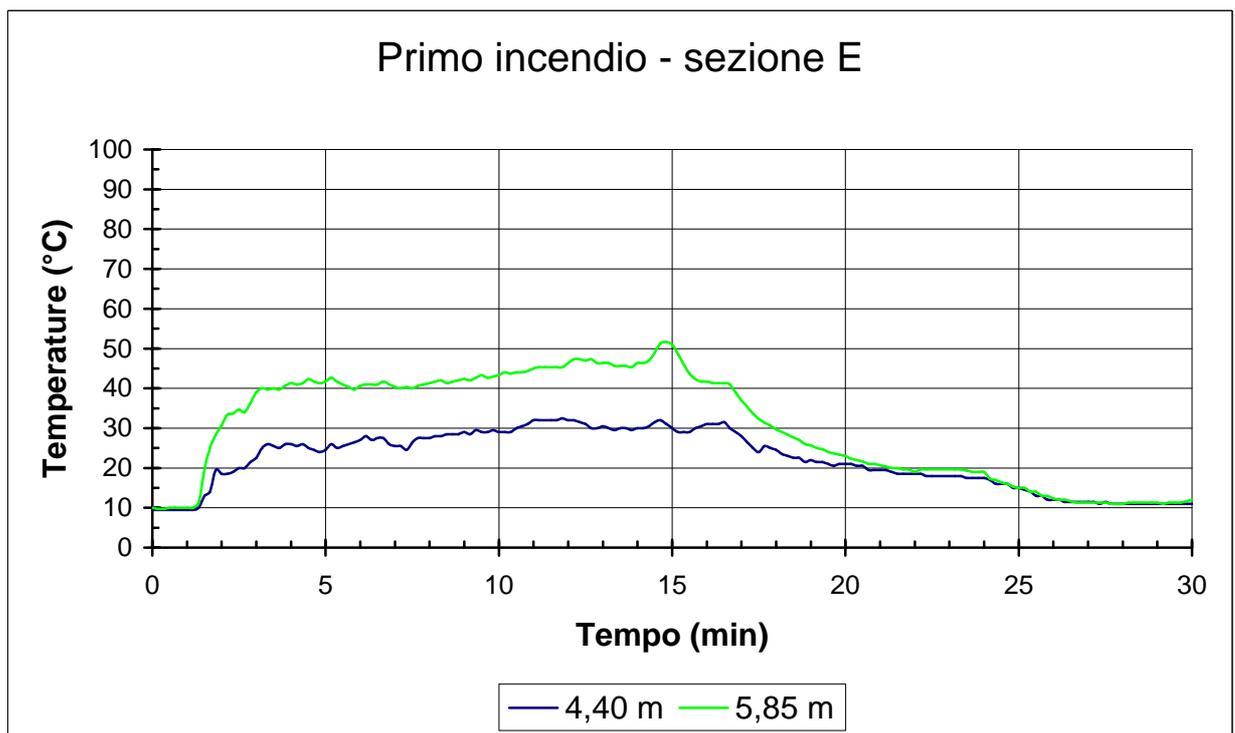
Graf. 3 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione B



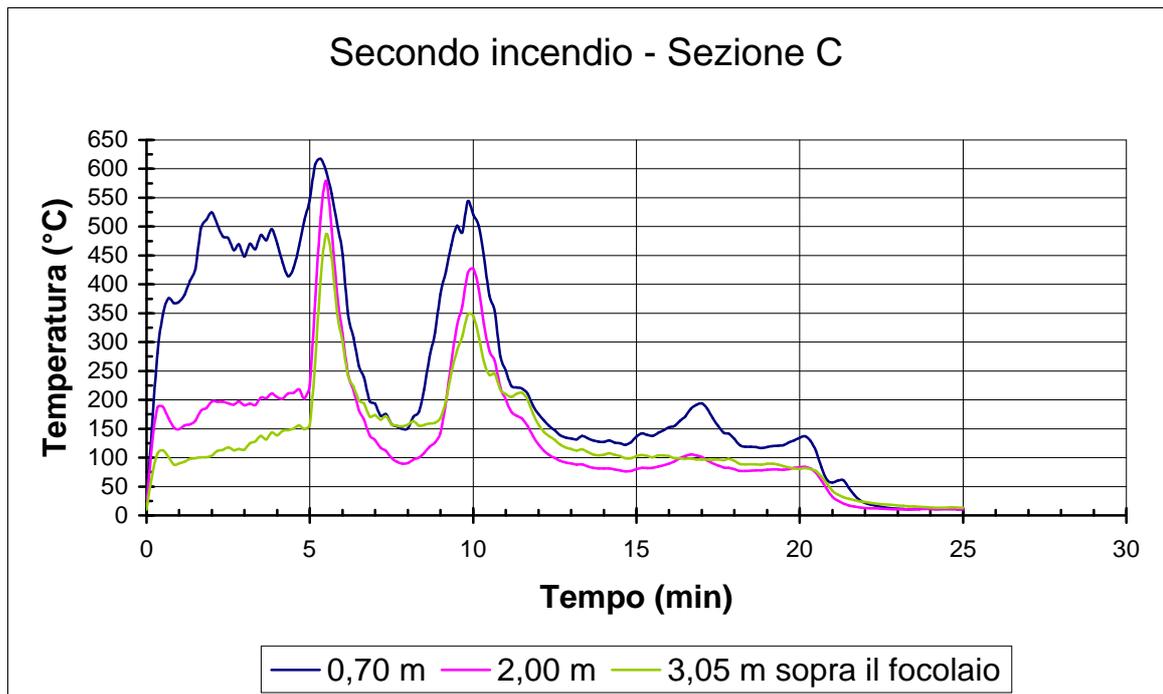
Graf. 4 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione A



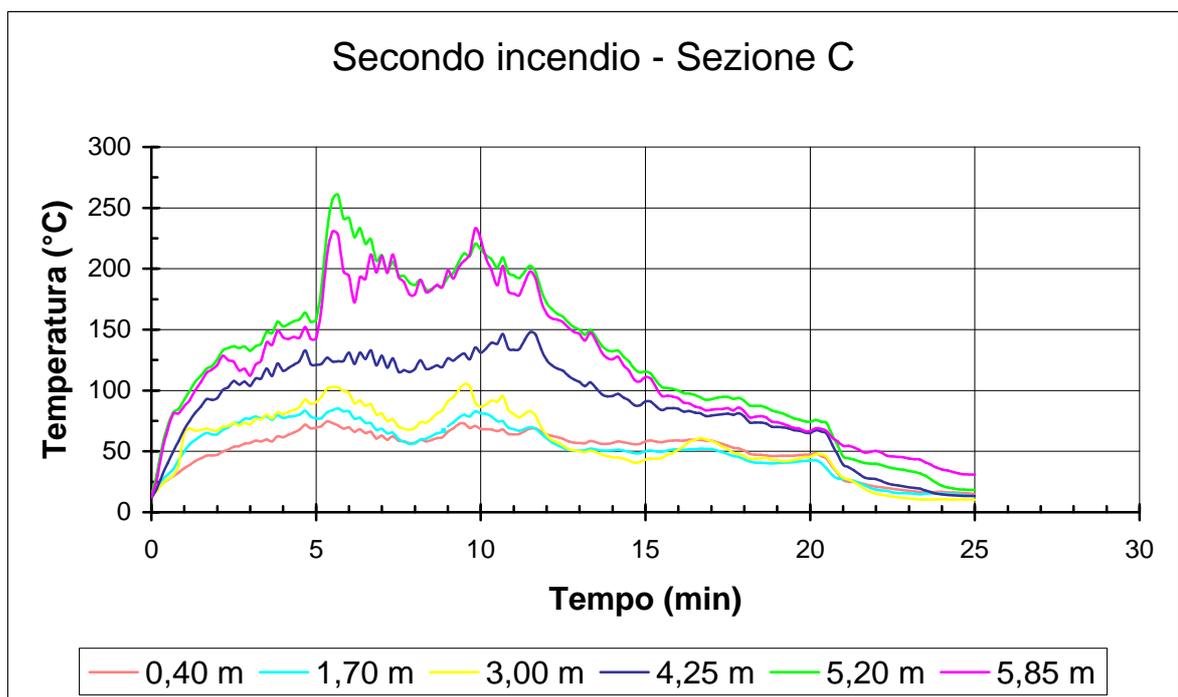
Graf. 5 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione D



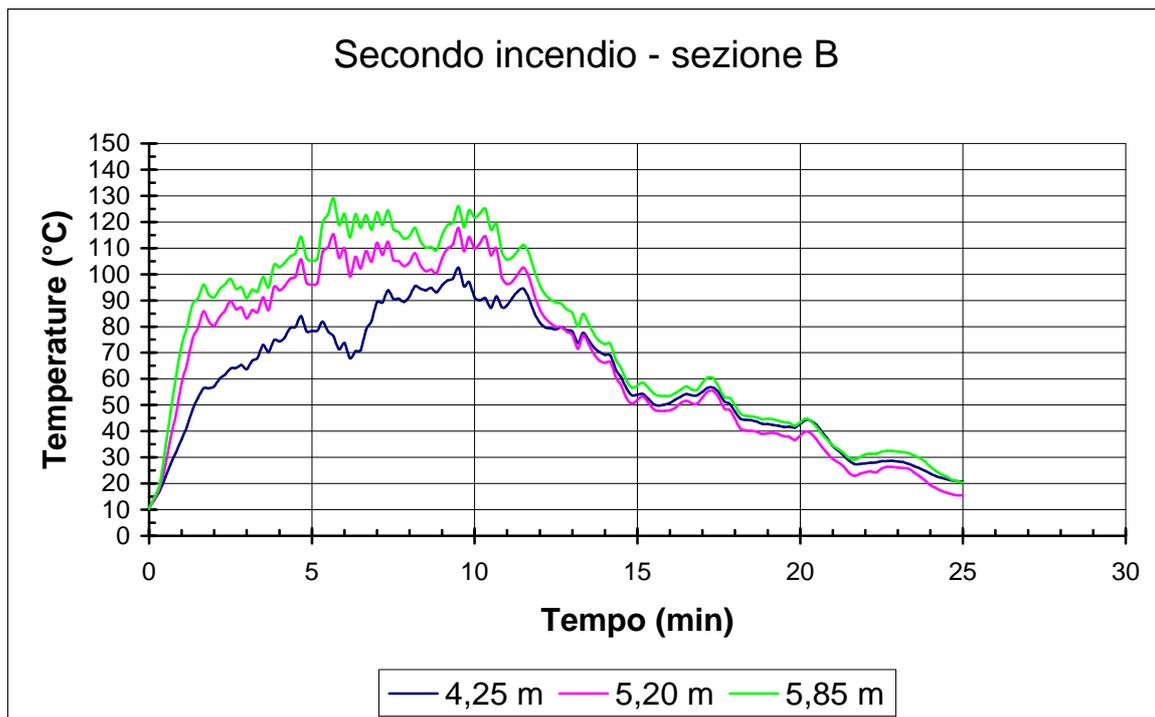
Graf. 6 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione E



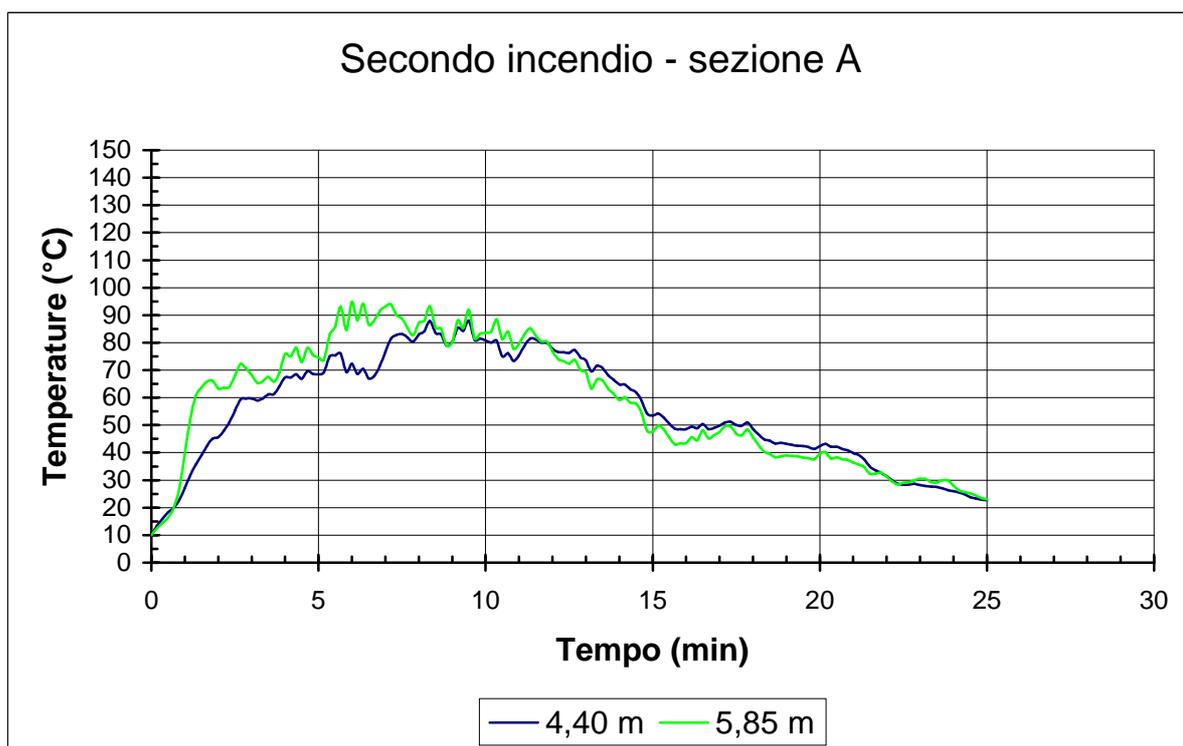
Graf. 7 Andamento della temperatura alle tmcc 11, 12, 13 – Stazione C



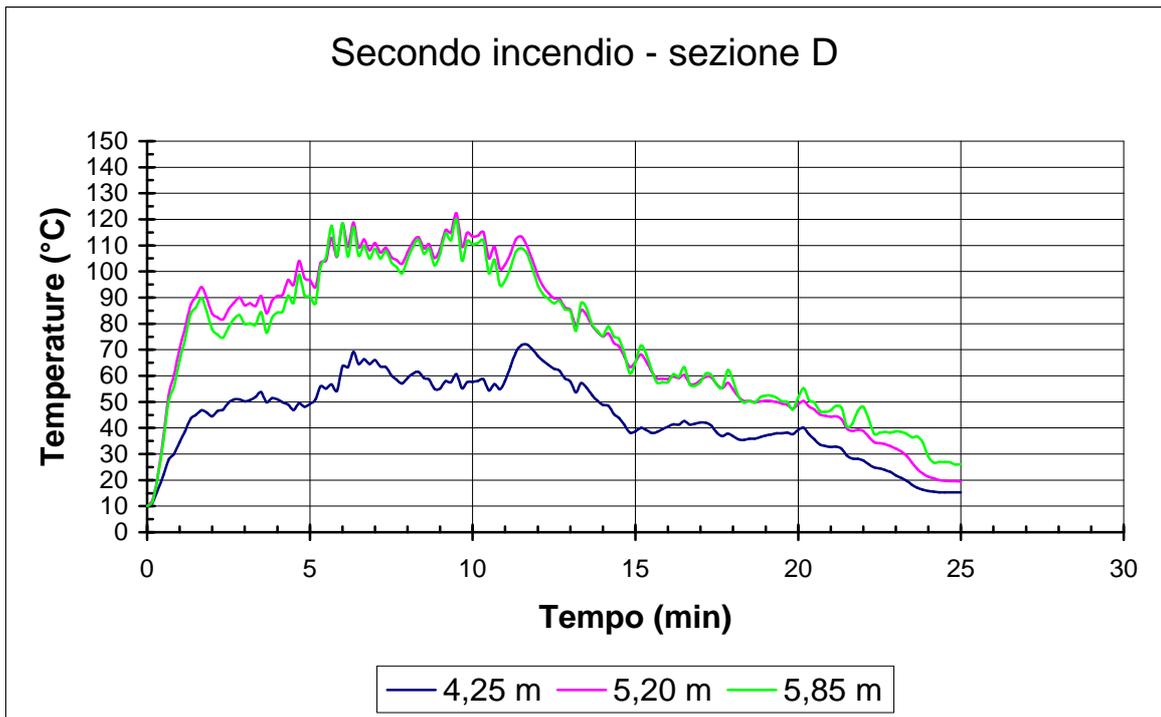
Graf. 8 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione C



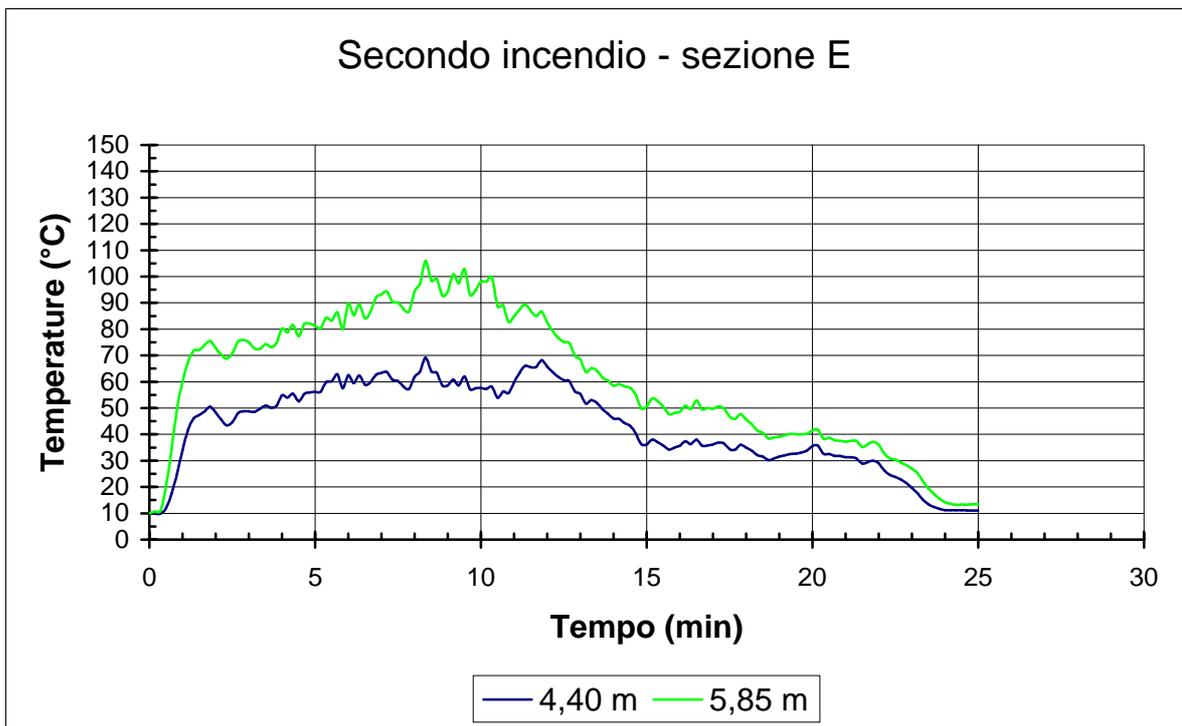
Graf. 9 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione B



Graf. 10 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione A



Graf. 11 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione D



Graf. 12 Andamento delle temperature a diverse quote – Stazione E