



Incendio alla stazione metropolitana di King's Cross

■ Vasco Vanzini

L'abstract

Alcuni eventi incidentali, in considerazione delle conseguenze particolarmente gravi, ed a seguito dei successivi, doverosi approfondimenti, effettuati allo scopo di comprendere pienamente le cause e accertare le responsabilità, unitamente alla ricerca delle circostanze che hanno influito negativamente sull'evolversi degli avvenimenti e sulla relativa gestione emergenziale, rappresentano dei punti di svolta che hanno influenzato sia il livello delle conoscenze scientifiche che il quadro normativo di riferimento.

Uno di questi è l'incendio, avvenuto nella stazione di King's Cross della metropolitana di Londra il 18/11/1987, evento che ha causato la morte di ben 31 persone. Un vero e proprio case-study che ha portato all'individuazione delle particolari condizioni verificatesi, fino ad allora mai evidenziate, che hanno governato l'andamento dell'incendio.

Londra è dotata del sistema ferroviario urbano più esteso e più vecchio del mondo occidentale, detto “the Tube”, superato per dimensioni, negli ultimi anni, soltanto dalla moderissima metropolitana di Shanghai.

Le prime gallerie sono state realizzate a partire dal 1863, per risolvere il problema del collasso del traffico pendolare ferroviario proveniente da Sud che non era in grado di consentire il raggiungimento diretto del centro della City. Nel 1987, la rete metropolitana londinese, costituita da 9 linee e da 270 stazioni, di cui 130 interrate, e da 450 treni, alcuni dei quali vecchi di oltre 70 anni, tra-

sportava 2,6 milioni di passeggeri al giorno, complessivamente 800 milioni all'anno. La stazione di King's Cross, all'epoca dei fatti, era la più affollata della Gran Bretagna, il principale nodo di collegamento fra i convogli provenienti da Nord e i 260 chilometri di binari urbani (oggi i chilometri sono 418) ed era frequentata da ben 250.000 persone al giorno, essendo servita dalla Metropolitan line (contraddistinta dal colore viola), dalla Northern line (di colore nero), dalla Piccadilly line (blu scuro) e dalla Victoria line (azzurro). La stazione risultava pertanto essere piuttosto complessa, costituita da 5 livelli collegati fra di loro da un reticolo di corridoi, scale, scale mobili, canali, pozzi e gallerie. Erano presenti nell'atrio della stazione, oltre all'ufficio centrale di prenotazione e alle 7 biglietterie, alcuni negozi, soltanto in parte protetti da impianto sprinkler. Il giorno dell'incendio erano in corso lavori di ammodernamento della stazione e di realizzazione di un sistema di biglietteria automatica. Il cantiere, delimitato da pannellatura in legno ignifugato, limitava la fruizione di una scala e l'accessibilità all'idrante.

Nel corso della Seconda Guerra Mondiale, le stazioni della metropolitana di Londra sono state utilizzate come rifugio antiaereo da milioni di londinesi durante gli attacchi aerei da parte della Germania nazista.

Si sono tuttavia verificati alcuni disastri:

- 14 ottobre 1940, una bomba cadde in strada sopra Balham tube station, l'esplosione penetrò nel tunnel fino a 9 metri di profondità. Le reti idrica e fognaria si ruppero causando allagamenti e la perdita di 68 vite
- 11 gennaio 1941 la biglietteria della Bank station, Central Line, fu colpita direttamente da una bomba che causò il crollo della strada e la morte di 56 persone
- 13 marzo 1943 nella stazione di Bethnal Green, il panico causato dall'utilizzo di un nuovo tipo di batteria contraerea nelle vicinanze, provocò la morte nelle trombe delle scale per schiacciamento di 173 persone
- 13 ottobre 1940 una bomba colpì la Bounds Green station, uccidendo 16 persone.

Alle 19,25, orario dell'evento, il centro della città risultava affollatissimo per l'inizio dei saldi natalizi.

L'incendio ha interessato una scala mobile che collegava la Piccadilly line, posta a 27 metri di profondità, con l'atrio della biglietteria della stazione di King's Cross; la scala, installata nel 1939, non era mai stata ammodernata e risultava essere ancora in legno, come peraltro gran parte delle scale mobili al servizio delle linee più vecchie, la velocità di progetto era compresa fra i 30 e i 35 metri al minuto, l'inclinazione alla base era di 30°, il dislivello superato pari a 21 metri, la tipologia costruttiva adeguata ad un utilizzo gravoso. Pedate in compensato con spessore di 17 millimetri su supporto metallico, tacchetti in legno di acero ed elementi parafuoco laterali atti ad evitare la caduta di mozziconi di sigaretta o di fiammiferi tra le pedate ed i battiscopa.

La distanza fra gradino e battiscopa era variabile e dipendente dalla regolazione delle catene di funzionamento della scala mobile, fino ad un massimo di 15 millimetri. I montanti erano realizzati in rovere sagomato, le balaustre in compensato e i corrimano in



Mapa attuale della metropolitana di Londra. Particolare della stazione di King's Cross

gomma con giunti vulcanizzati e distanziali in legno. Le ruote del rimorchio e le catene in plastica, erano lubrificate con grasso.

Cronologia degli eventi

La cronologia principale degli eventi, ai fini dei temi trattati nel presente articolo, risulta essere la seguente:

- il principio d'incendio, originatosi presumibilmente alle 19,25, viene avvistato alle 19,29 sotto un gradino, sul lato destro, nella parte superiore della scala mobile n.4 che sale dalla Piccadilly Line alla King's Cross Station, l'evento viene riferito al personale della biglietteria.
- Alle 19,30 la scala in legno viene prontamente bloccata dall'azionamento dell'allarme manuale posto in cima alla scala da parte di un secondo passeggero che urla agli altri di scendere e tornare indietro, i gradini sotto i quali si vede il bagliore delle fiamme si arrestano a circa 11 metri sotto il livello dell'atrio della biglietteria.
- Alle 19,32 il personale della metropolitana e gli agenti di polizia presenti in stazione scendono a controllare la situazione, attuando le procedure previste, bloccano le scale mobili n° 5 e n° 6 e risalgono per chiamare la Centrale Operativa della London Regional Transport, in quanto le radio in dotazione sottoterra non funzionano. Notano del fumo e una sola fiamma di 3-4 centimetri di altezza. Non sono mai state effettuate prove di addestramento in stazione finalizzate ad affrontare un incendio o a gestire un'evacuazione, la posizione del fuoco è tale da non consentire l'intervento efficace mediante l'utilizzo di estintori, se non sollevando i gradini della scala mobile, né sono presenti idranti al piano dei binari.
- Alle 19,33 una chiamata di emergenza viene ricevuta dalla British Transport Police che attiva tramite il 999 i Vigili del fuoco di Londra (London Fire Brigade).
- Alle 19,34 viene allertata la squadra della Fire Station di Soho a circa 3 km da King's Cross Station.



GUIDA PRATICA ALLA NUOVA PREVENZIONE INCENDI

Applicazione del D.P.R. 1/8/2011 n. 151 e del D.M. 7/8/2012
Progettare, realizzare, gestire nel rispetto degli standard antincendio

La guida pratica alla nuova prevenzione incendi ha la finalità di fornire a imprenditori, datori di lavoro, RSPP, professionisti, installatori e organi di controllo uno strumento agevole, sugli adempimenti tecnici e procedurali necessari per garantire ad un'azienda, un edificio, un impianto, il necessario livello di sicurezza nel rispetto delle nuove disposizioni di prevenzione incendi emanate con il D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151, il D.M. 7 agosto 2012 e il D. 31 ottobre 2012, n. 200. Ogni capitolo della guida affronta in modo approfondito, con linguaggio semplice ma tecnicamente corretto, i vari argomenti delineati in diagrammi e schemi a blocchi che guidano l'utente all'individuazione e gestione della propria attività nel rispetto degli standard antincendio.

Nuova Edizione

- Nel CD-Rom un diagramma interattivo, collegato con la nuova modulistica del Decreto Dirigenziale 31/10/2012, n. 200 e i nuovi provvedimenti normativi che guida l'utente all'attuazione delle procedure corrette

Autore: G. Giomi - **II Ed:** gen. 2013 - **Pag.:** 368 - **Prezzo:** € 31,50 anziché € 33,00



IMPIANTI ANTINCENDIO

Secondo la regola tecnica emanata nel Decreto Ministeriale del 20/12/12
Tipologia, progettazione, realizzazione, collaudo, manutenzione, esempi pratici

Aggiornato secondo tutte le ultime novità normative europee ed internazionali, ampliato per trattare con più dettaglio i sistemi water mist, il volume cerca di dare risposte esaurienti sul fronte della sicurezza utilizzando i cosiddetti "impianti di protezione attiva". Una guida dettagliata che, oltre ad offrire una panoramica completa di tutte le norme vigenti in Italia, fa anche riferimento agli standard europei ed alla applicazione del regolamento CPR e della marcatura CE ormai pienamente operative. Uno strumento utilissimo per avere sempre sotto mano un quadro sintetico e comparativo dei pregi e difetti che accompagnano ogni sistema di protezione attiva antincendio, non perdendo mai di vista l'obiettivo di realizzare misure realmente efficaci.

Autore: L. Nigro - **IV Ed.:** settembre 2012 - **Pag.:** 560 - **Prezzo:** € 29,70 anziché € 32,00



GUIDA PRATICA DI PREVENZIONE INCENDI PER ATTIVITÀ NON NORMATE

Secondo il D.P.R. 151/2011 e il D.M. 7/8/2012. Manuale operativo per attività soggette e non soggette al controllo dei VVF - Valutazione del rischio di incendio - Piano di emergenza - Formazione degli addetti.

Il volume, consente di elaborare la relazione tecnica antincendio che verrà consegnata ai VV.F., ma anche di effettuare la valutazione dei rischi o il relativo aggiornamento annuale di attività anche complesse, di mettere a punto un corretto piano di emergenza e di formare, infine, il personale.

- Il CD-Rom allegato contiene tutta la nuova normativa, gli esempi di relazione tecnica tipo per attività non normata e di valutazione del rischio incendio e tutta la modulistica VV.F. predisposta dal C.N.VV.F.

Autori: S. Marinelli, A. Maggi - **II Ed.:** sett. 2012 - **Pag.:** 304
Prezzo: € 18,90 anziché € 21,00





GUIDA AGLI EUROCODICI 1, 2, 3 e 4

Resistenza al fuoco delle strutture: EN 1991-1.2, EN 1992-1.2, EN 1993-1.2 E EN 1994-1.2

La Guida agli Eurocodici per la resistenza al fuoco delle strutture non riguarda un singolo Eurocodice ma tratta singolarmente i seguenti materiali, analizzandone la parte dedicata alla resistenza al fuoco: le costruzioni in acciaio; in cemento armato; miste acciaio-calcestruzzo; legno. Uno degli scopi di questo libro è quello di chiarire tale approccio così che possa essere compreso pienamente e facilmente utilizzato dagli ingegneri civili e dagli specialisti che hanno familiarità con i principi e le ipotesi alla base della progettazione strutturale a temperatura ambiente. Il libro è una guida a quattro documenti distinti, vale a dire la EN 1991-1.2, la EN 1992-1.2, la EN 1993-1.2 e la EN 1994-1.2, con riferimenti, ove necessario, anche alle basi della progettazione strutturale contenute nel documento EN 1990.

Autori: T. Lennon, D.B. Moore, Y.C. Wang e C.G. Bailey - Traduzione di S. Tedeschi e C. De Domenico – **Ed.:** maggio 2011 - **Pag.:** 176 - **Prezzo:** € 31,50 anziché € 35,00

LA VALUTAZIONE DEI RISCHI DI INCENDIO



Norme e standard internazionali di riferimento, metodi e tecniche di analisi, definizione della strategia antincendio, gestione del rischio nel tempo, casi studio ed esempi applicativi

L'opera si prefigge la diffusione delle tecniche di analisi per stimare il rischio di incendio connesso con le attività produttive, industriali e civili oppure, anche nell'ambito di un approccio prestazionale della sicurezza antincendio ('FSE') per individuare gli scenari di incendio da assoggettare ad un approfondimento di tipo deterministico.

- Il Cd-Rom allegato al volume contiene lo strumento F.R.A.M.E. Fire Risk Assessment Method for Engineering, del Prof. E. De Smet (Belgio), tradotto in lingua italiana e corredato da 76 esempi completi.

Autori: L. Marmo e L. Fiorentini: consulenti tecnici della Procura di Torino nell'inchiesta a seguito dell'incidente ThyssenKrupp con la prefazione di R. Guariniello, M. Hurley, D. Yung, S. Converso **Ed.:** aprile 2011 - **Pag.:** 720 - **Prezzo:** € 51,30 anziché € 57,00

Solo per acquisti effettuati direttamente presso la casa editrice - Inviare al fax 0633111043

<input type="checkbox"/> GUIDA PRATICA ALLA NUOVA PREVENZIONE INCENDI (0430)	€ 31,50	anziché € 35,00
<input type="checkbox"/> IMPIANTI ANTINCENDIO (0421)	€ 29,70	anziché € 33,00
<input type="checkbox"/> GUIDA PRATICA DI PREVENZIONE INCENDI PER ATTIVITÀ NON NORMATE (0397)	€ 18,90	anziché € 21,00
<input type="checkbox"/> GUIDA AGLI EUROCODICI 1, 2, 3, 4 (0272)	€ 31,50	anziché € 35,00
<input type="checkbox"/> LA VALUTAZIONE DEI RISCHI DI INCENDIO (0321)	€ 51,30	anziché € 57,00

Spese di spedizione € 6,00 (IVA compresa) (sopra € 150 le spedizioni sono a nostre spese) **Importo totale** €

DATI PER LA FATTURAZIONE

Ragione sociale

Via..... C.A.P Pr.....

P. IVA C.F (obblig.).....

Tel./Fax E-mail

DATI PER LA SPEDIZIONE (Se diversi da quelli di fatturazione)

Nome Cognome

Funzione Azienda/ente

Indirizzo..... C.A.P Pr.....

Tel. Cell.

MODALITÀ DI PAGAMENTO

- Contrassegno
- Versamento sul c.c.p. n. 33135005 intestato a EPC srl - Socio Unico - Via dell'Acqua Traversa 187/189 - 00135 Roma
- Bonif. bancario: UBI - BPCI - Ag. 2096 - IBAN: IT 92 5 05048 03208 00000000535

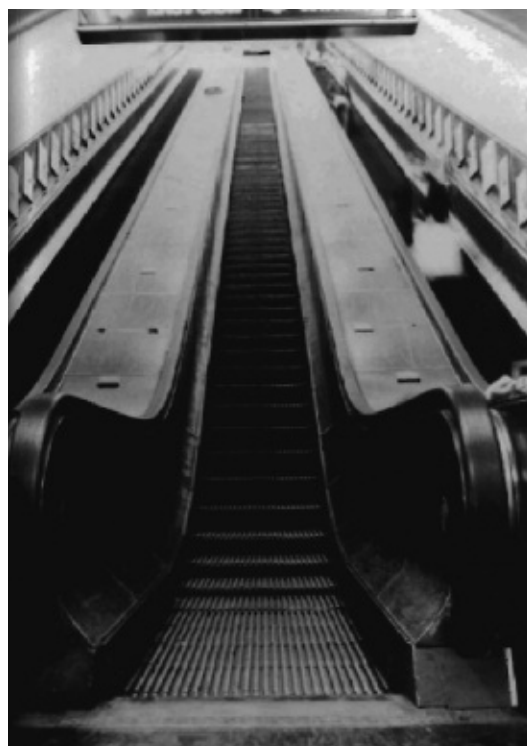
Firma Data

INFORMATIVA AI SENSI DELL'ART. 13, DECRETO LEGISLATIVO 196/2003.

I dati raccolti potranno essere utilizzati dal Gruppo EPC - Informa per l'invio di materiale promozionale. La modifica o cancellazione dei dati può essere richiesta a: catalogo@epc.it altrimenti barrare la casella non desidero alcuna comunicazione



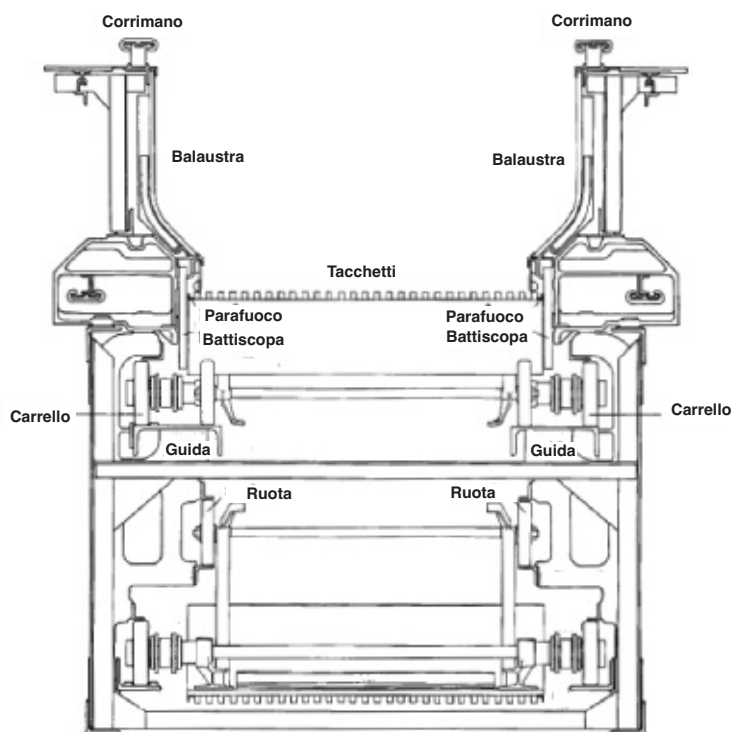
- Alle 19,36 vengono inviate anche le squadre dei Vigili del fuoco delle stazioni di Clerkenwell e di Manchester Square.
- Alle 19,39 la Polizia decide di evacuare la stazione utilizzando le scale mobili della Victoria Line le uniche ancora funzionanti.
- Alle 19,40 viene ordinato ai treni della Piccadilly Line e della Victoria Line di non fermarsi a King's Cross Station.
- Alle 19,42 un treno della Piccadilly Line in direzione est si ferma e lascia scendere i passeggeri, così come un treno della Northern Line in direzione nord (in numero di 50 persone).
- Alle 19,43 i Vigili del fuoco arrivati alla biglietteria della stazione scendono per valutare l'incendio che appare ancora di dimensioni contenute e non preoccupante ("come una scatola di cartone di grandi dimensioni"), anche se le fiamme paiono lambire il corrimano sul lato sinistro visto dal basso, e si apprestano alle operazioni di spegnimento mediante l'utilizzo dell'idrante posizionato nell'atrio della biglietteria.



Scala mobile in Piccadilly Line e in basso la sua sezione

Un altro treno sulla Piccadilly Line in direzione ovest si ferma, ultimo, a lasciar scendere i passeggeri, mentre quelli della Northern Line hanno continuato il servizio regolare fino alle 19,48; le squadre di soccorso si rendono conto che gli ordini di blocco del traffico ferroviario non sono stati eseguiti correttamente, la situazione si sta aggravando e viene richiesto di far convergere delle ambulanze in superficie.

- Alle 19,44 l'atrio della stazione viene istantaneamente investito da calore intenso e da spesso fumo nero, non si vede più nulla e le persone urlano, la situazione precipita, i Vigili del fuoco tentano l'evacuazione delle persone che sono ancora presenti nell'atrio in quanto



scese dai convogli che hanno effettuato le fermate.

- Alle 19,45 si verifica il flashover ed un violento getto di fiamme, calore e fumo denso investe l'atrio della biglietteria, alla velocità di 12 m/s, uccidendo 31 persone, fra cui il responsabile dei Vigili del fuoco, mentre oltre 100 sono i ricoverati presso le strutture sanitarie cittadine. Tra le 19,30 e le 19,45, non una sola goccia d'acqua è stata versata sull'incendio. Le persone ancora presenti al livello dei binari si metteranno in salvo utilizzando i treni della Victoria Line, il cui transito non è mai stato bloccato, o percorrendo improbabili percorsi sotterranei.
- Alle 1,46 l'incendio è stato dichiarato definitivamente spento.

L'incendio

La successiva ricerca delle cause ha consentito di individuare nelle tavole della zoccolatura in legno sottostanti l'impianto, le tracce di ben 18 precedenti punti di ignizione che tuttavia non si erano propagati e trasformati in incendio.

Le bruciature, riconducibili a sigarette o a fiammiferi ancora accesi, gettati e caduti nella zona del carrello sottostante i gradini, at-



London Fire Brigade (LFB)

È oggi il quarto servizio antincendio metropolitano più grande del mondo dopo il Tokio Fire Department (TFD), il New York City Fire Department (NYCFD), e le Brigade de Sapeur-Pompiers de Paris (BSPP). È composto da 7.000 unità di cui 5.800 operativi distribuiti in 112 Fire Station.

traverso lo spazio presente fra le pedate e il battiscopa, si trovavano quasi tutti sul lato destro del carrello, a conferma della consuetudine dei passeggeri frettolosi di muoversi salendo sul lato sinistro della scala mobile. Il lato destro è infatti occupato dai fruitori che stanno fermi sui gradini e fra questi, ai tempi, era abitudine per qualcuno, accendersi una sigaretta e fumare. Il divieto di fumo, infatti, era stato imposto nelle stazioni della metropolitana di Londra solo dal febbraio del 1985, a seguito di un incendio avvenuto alla stazione di Oxford Circus, ma non era, di fatto, rispettato né fatto rispettare. Precedentemente infatti, non si erano mai verificati gravi incendi nella metropolitana e l'atteggiamento della London Regional Transport, l'Agenzia del trasporto pubblico della Grande Londra, era di scarsa attenzione nei confronti delle problematiche relative. Nelle procedure operative previste, il fuoco doveva essere contrastato dal personale interno, salvo poi chiamare i Vigili del fuoco soltanto quando questo non poteva essere più controllato. Il principio d'incendio era considerato dall'Azienda come inevitabile, data la vetustà delle strutture, ma non potenzialmente pericoloso, in quanto nessuna persona era mai morta a causa di un incendio in metropolitana, né si era mai verificato un flashover. Nei rapporti relativi alle segnalazioni di allarmi precedenti non si parlava mai di fuoco ma veniva utilizzato l'eufemismo "fumante" (smouldering).

L'incendio in Oxford Circus, avvenuto il 23/11/1984, era stato l'unico episodio rilevante di incendio all'interno di una stazione della metropolitana di Londra prima di King's Cross. L'evento, le cui cause erano state attribuite ad una sigaretta caduta attraverso una griglia di ventilazione all'interno di un locale di deposito in uso agli appaltatori che lavoravano all'ammodernamento della stazione, causò l'intossicazione di 14 persone (4 passeggeri, 1 ufficiale di polizia e 9 dipendenti della metropolitana), oltre a danni da calore alla Victoria Line e da fumo alla Bakerloo Line.

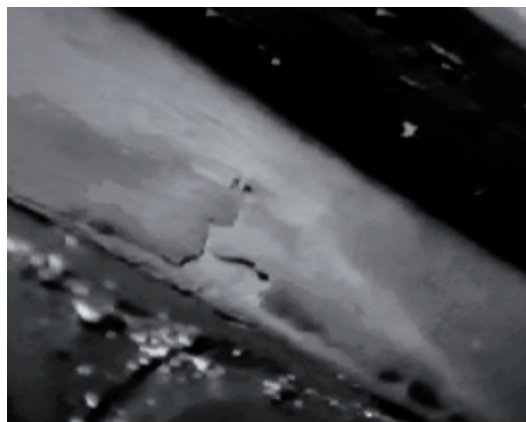
L'accurata analisi dei resti della scala mobile ed i test sperimentali effettuati successivamente in laboratorio, hanno dimostrato come la piccola fiamma di un fiammifero fosse in grado di sciogliere e poi innescare il grasso, usato per lubrificare il carrello, reso infiammabile dalla combustione della sporcizia presente costituita da frammenti cartacei, lanugine, capelli e peli di ratto che si erano accumulati nel tempo e che costituivano un vero e proprio "letto" combustibile venutosi a formare sotto i gradini della scala mobile.

Il fuoco si è così propagato sotto le pedate, coinvolgendo il lato sinistro della scala mobile, ed i rivestimenti lignei, per poi interessare il compensato secco del battiscopa, impregnato di olio e grasso, e diffondersi alle balaustre, trattate con vernice navale, alle pedate e alle alzate in legno e quindi alle guide in gomma, con uno sviluppo di potenza termica pari a 7 megawatt. Il fumo osservato e riferito da varie testimonianze era fino a quel momento, bianco, grigio-bianco o grigio, con un odore principalmente di fuoco di legna. L'improvviso cambiamento delle condizioni è avvenuto alle 19:43-19:45, quando un fuoco modesto, in soli 2 minuti, si è trasformato in una palla di fuoco che ha investito, devastandolo completamente, l'atrio della biglietteria, seguito istantaneamente da un denso fumo nero e denso causato dalla combustione della vernice posata a soffitto e delaminata per effetto del calore.

La *tabella 1* fornisce una stima della massa di materiale bruciato durante l'incendio, pari a quasi quattro tonnellate. L'81% del totale del combustibile consumato è stato rappresentato dalle scale mobili. Del combustibile bruciato nel vano scala mobile, il 76% è stato rappresentato da componenti in legno.

Il rapporto investigativo

Il rapporto pubblicato sui fatti, elaborato a seguito delle investigazioni operate dall'Health & Safety Executives (HSE) ha messo in evidenza sia le inadeguatezze nella gestione



Zoccolatura della scala mobile, precedente punto d'accensione



Test di accensione sul grasso lubrificante sporco

della sicurezza da parte della London Regional Transport (mancata formazione del personale, assenza di un piano di evacuazione della stazione, inadeguatezza del sistema di comunicazione, assenza di una supervisione) che hanno portato alle dimissioni dei Dirigenti, sia i fenomeni che hanno caratterizzato l'evoluzione anomala dell'incendio.

L'esame delle cause e la ricostruzione, effettuata anche con metodi computazionali, della dinamica dell'evento ha infatti consentito di comprendere quali siano stati gli "effetti" che ne hanno definito lo sviluppo e determinato le drammatiche conseguenze.

I contrasti emersi fra i vari studiosi incaricati della modellazione dell'incendio, relativi al ruolo svolto dalla combustione della vernice marina (Prodorite) applicata al soffitto del va-

Tabella 1 - Massa totale del materiale bruciato e calore rilasciato

	Massa del materiale bruciato (kg)	Calore rilasciato Mj
1. Condotto della Scala mobile in Piccadilly Line		
(a) COMPONENTI IN LEGNO		
battiscopa	394	7490
paracolpi	104	1872
balaustra	374	6732
rivestimento	187	3366
corrimano	58	1218
pannello comandi	174	3132
alzata	253	5313
pedata	736	13984
tabelloni pubblicitari	152	2432
(b) ALTRI COMPONENTI		
ruote della scala mobile	222	5328
vernice del soffitto	108	1188
grasso delle guide	150	5100
corrimani in gomma	277	7202
annunci in materiale plastico	6	*
2. Sala della biglietteria della metropolitana		
(a) COMPONENTI IN LEGNO		
pannellatura temporanea	282	5358
biglietteria (supporti e compensato)	223	4237
(b) ALTRI COMPONENTI		
melamina	50	*
vernice del soffitto	200	*
TOTALE - CONDOTTO DELLA SCALA MOBILE	3195	64357
TOTALE - BIGLIETTERIA	755	9595

* valori calorifici non noti

no scale mobili, hanno portato all'effettuazione di prove sperimentali, a tal fine, un modello della stazione di King's Cross è stato ricostruito presso l'Atomic Energy Research Establishment. Le varie teorie avanzate infatti non erano in grado di spiegare la velocità di propagazione dell'incendio rilevata pari a 2 metri/secondo, sconosciuta fino a quel momento nel mondo scientifico, né, nonostante i fenomeni di delaminazione rilevati, la combustione della vernice sembrava essere in grado di auto sostenere la combustione fino all'atrio della biglietteria. In effetti, in brevissimo tempo (2-3 minuti) si era passati da un fuoco da 1-2 megawatt di potenza (piccolo falò), ad un flashover con fiamme lunghe almeno 4 o 5 metri. Le prove sperimentali effettuate, unitamente alle testimonianze raccolte e alle modellazioni computazionali eseguite hanno consentito di escludere il coinvolgimento della vernice fino al raggiungimento del flash over.

Effetto trincea

La ricostruzione dell'incendio ha dimostrato che nelle particolari condizioni costituite da una superficie combustibile sufficientemente inclinata, i vapori sprigionati dalla pirolisi invece di innalzarsi in verticale aderiscono alla superficie stessa accumulandosi nello spazio soprastante, preriscaldando i materiali in superficie permettendo alle fiamme di diffondersi molto più velocemente. I lati della scala mobile, anch'essi in legno contenevano ulteriormente le fiamme impedendo la dispersione del calore, incanalandole e generando un getto inclinato. Le prove sperimentali effettuate anche in scala reale hanno consentito di misurare temperature di 500-600° Celsius nello spazio sopra i gradini a 20 metri dal fronte di avanzamento delle fiamme. Per la prima volta, quindi, in occasione degli approfondimenti successivi alla catastrofe di King's Cross, è stato rilevato il verificarsi del cosiddetto "trench effect" effetto trincea, ovvero l'attaccamento della fiamma ad una superficie inclinata, e confinata come possono essere le scale mobili o le scale racchiuse in una strut-



Accumulo di grasso e detriti nel carrello della scala mobile



L'atrio della biglietteria distrutto

tura edilizia, che favorisce il flashover accelerando fortemente la velocità della combustione e l'avanzamento del fronte di fiamma. Nel caso dell'incendio di King's Cross, gli esperimenti effettuati anche in scala reale hanno mostrato come l'incendio si sia sviluppato e propagato all'interno della trincea costituita dall'involucro della scala mobile in legno, al di sotto del livello del corrimano, restando aderente alle superfici, con un tasso di crescita esponenziale fino a fuoriuscire con un getto continuo di fiamme dalla parte superiore di essa. Negli istanti precedenti al flash over, le fiamme visibili erano solo una porzione dell'incendio, in realtà già pienamente sviluppato nella trincea della scala mobile.

La verifica sperimentale

Il lavoro di ricerca svolto presso la Fire Safety Engineering Unit of Edinburgh University da parte dell'equipe guidata da Drisdale e

Wu ha individuato 4 fattori come parametri principali per il verificarsi dell'effetto trincea: la pendenza della scala, il suo profilo geometrico, il materiale di costruzione e la fonte di accensione del fuoco. Una serie di esperimenti sono stati effettuati per esaminare l'influenza di ogni fattore rilevante sul comportamento della fiamma indipendentemente dagli altri, arrivando alle seguenti conclusioni:

- il modello di propagazione del fuoco è notevolmente influenzato dall'angolo di inclinazione della trincea
- affinché si verifichi l'effetto occorre il coinvolgimento di tutta la trincea e quindi un fuoco ben propagato, a prescindere dal tasso di produzione del calore
- l'effetto trincea è stato raggiunto indipendentemente dal tipo di materiale combustibile impiegato; il grado di umidità ha influenzato l'accensione e la prima propagazione dell'incendio, ma non l'evidenziarsi dell'effetto.

Nella prima serie di prove, la portata del propano, combustibile di prova utilizzato, era di 6 litri/minuto, in grado di generare una fiamma lunga 300 mm. circa e una potenza termica di 9,9 kW. L'andamento qualitativo delle temperature rilevate è stato il seguente:

- con angolo di 15°, il plume era quasi verticale nel superare la trincea, la misurazione della temperatura al suo interno indicava che i gas caldi si erano allontanati dalla trincea già a 125 mm. di distanza dalla parte anteriore del bruciatore utilizzato per la simulazione dell'innescio, e che a 500 mm. la temperatura all'interno della trincea era quella ambientale.
- Con inclinazione di 17° la fiamma pareva sdraiarsi sul pavimento della trincea, ma il pennacchio galleggiante si sollevava ancora quasi verticalmente e i gas caldi si allontanavano ad una distanza di 500 mm. dal bruciatore, la temperatura appariva non aumentare rispetto a quella ambientale a 10 m. dal bruciatore (circa metà della lunghezza della trincea).
- Con inclinazione di 19° il comportamento

appariva simile all'esperienza precedente.

- Con inclinazione di 21° invece il flusso principale dei gas caldi percorreva, galleggiando tutta la trincea fino ad uscire dall'estremità superiore. La temperatura, misurata appariva altamente stratificata: a 500 mm. dal bordo anteriore del bruciatore, nella parte superiore della trincea, a 270 mm. sopra il pavimento la temperatura era prossima a quella dell'ambiente, al centro della trincea (140 mm. sopra) era appena superiore, mentre alla base (10 mm. sopra il fondo) era molto più alta. Questa stratificazione indicava che i gas galleggianti erano confinati all'interno della trincea e, in particolare, nella parte inferiore, vicino al piano. La stratificazione spariva a 1000 mm. dal bruciatore e quindi la temperatura diventava uniforme lungo la sezione trasversale, con evidente formazione dell'effetto trincea. L'angolo critico per l'evidenziarsi di tale effetto è stato individuato fra i 19° e i 20°.
- Nel test effettuato con angolo di 30° il comportamento è stato analogo.

Ulteriori prove sono state effettuate al fine di valutare l'influenza del tasso di produzione del calore della fiamma sul movimento dei gas galleggianti, variando la potenza della fiamma da 1,65 kW, a 9,9 kW, fino a 18,2 kW, confermando l'andamento osservato precedentemente. Tale comportamento è dunque indipendente dal tasso di rilascio del calore in gioco e quindi dal verificarsi o meno del flashover. Per questo motivo, anche se le prove sperimentali hanno previsto l'utilizzo di diverse termocoppie per la puntuale misurazione delle temperature raggiunte all'interno della trincea della scala mobile, a diverse altezze e a diverse distanze dal bruciatore utilizzato, è l'andamento qualitativo della propagazione del calore che rappresenta l'aspetto più significativo della simulazione realizzata in scala reale.

Ulteriori prove sono state effettuate con trincee in scala ridotta, (1/3 del reale), confermando lo stesso andamento qualitativo del-

le temperature, ed un angolo critico di 26° . Successivi esperimenti e simulazioni effettuati con diverse configurazioni di incendi in luoghi confinati, hanno confermato gli effetti della rapidità di diffusione anche con la riduzione dell'altezza o anche con la rimozione delle pareti laterali, attribuendo di fatto la rapida propagazione al superamento di un gradiente critico di pendenza di $24-27^\circ$ (D. Drysdale, Y. Wu) piuttosto che al calore prodotto o alle caratteristiche della superficie. Simulazioni computazionali hanno confermato i risultati sperimentali.

Effetto Coandă

S. Simcox (1992) ha concluso che "l'effetto trincea" è la risultante che deriva dalla combinazione di altri 2 fenomeni fisici ovvero l'effetto camino causato dalla fonte di calore e l'effetto Coandă che mantiene il plume a contatto con la superficie inclinata.

Alla velocità di riscaldamento del materiale combustibile conseguente all'aumento significativo della zona dove avviene la pirolisi a causa dell'azione dei gas di combustione presenti nel plume si viene quindi a sommare l'azione radente alla trincea dei gas stessi. L'effetto Coandă, utilizzato in aerodinamica, è la tendenza di un rapido flusso d'aria a seguire il contorno di una superficie vicina.

Un fluido, infatti, muovendosi lungo una superficie subisce un attrito che tende a farlo rallentare. La resistenza al moto è tuttavia maggiore per le particelle del fluido immediatamente a contatto con la superficie, mentre quelle più esterne, a causa delle interazioni molecolari che tendono a tenerle unite a quelle più interne, cambiano direzione verso di esse a causa della differenza di velocità. Si origina così un gradiente di pressione in direzione normale alle linee di flusso con il risultato di far aderire il fluido alla superficie. L'effetto Coandă è percepibile fino a quando il superamento della viscosità del fluido porta a fenomeni di separazione.

La viscosità è una grandezza fisica che quan-



tifica la resistenza dei fluidi allo scorrimento, quindi il loro grado di coesione interna. Nei liquidi decresce all'aumentare della temperatura, nei gas invece cresce.

Il contributo della ventilazione

La stima dei flussi d'aria in Piccadilly Line e in Victoria Line, sulla base dei movimenti dei convogli registrati fra le 19,30 e le 20,00 mostra che la velocità della stessa passa, alle 19,45, orario cruciale, da 1,75 metri al secondo verso i binari a 3,25 metri al secondo verso la scala mobile e, anche se le prove sperimentali hanno attribuito alla ventilazione un contributo modesto all'incendio (da 1 a 2 Mw su 25 Mw di potenza termica complessivamente rilasciata), l'effetto pistone causato dalla compressione dell'aria provocato dal movimento dei treni che hanno continuato a circolare ha certamente accelerato il raggiungimento del flash over. In particolare può aver innescato l'accensione dei gas di pirolisi prodotti (il fumo bianco costituito, fra gli altri da CO , H_2 e da idrocarburi quali il CH_4 , il C_2H_4 , il C_3H_6) e non ancora innescati in quanto non sufficientemente vicini alle fiamme, o perchè rimasti in parte imprigionati all'interno della trincea della scala mobile e nella parte sottostante alle pedate in ambiente quindi sottoventilato.

Nel primo caso si sarebbe trattato dell'accensione dei gas d'incendio (Fire Gas Ignition) posti inizialmente al di sotto della temperatura di autoaccensione, ma all'interno del campo di infiammabilità (in deficit ener-

Tabella 2 - Tabella qualitativa relativa alle temperature sperimentamente raggiunte

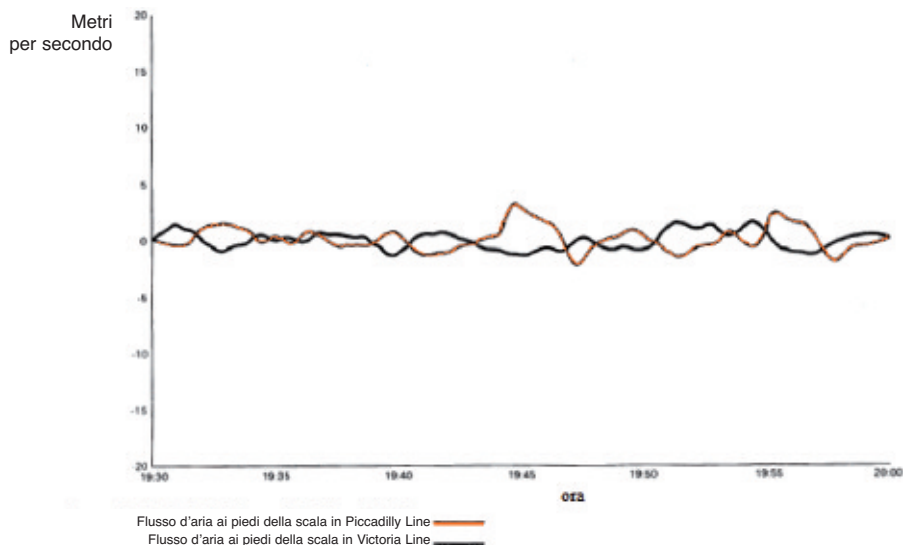
Angolo	Altezza punto di misura	T in prossimità del bruciatore	T a < 500 mm dal bruciatore	T a 500 mm dal bruciatore	T a > 1000 mm dal bruciatore	Trench effect
15°	Alto	Minore	Media	Ambiente	Ambiente	
	Centro	Media	Maggiore	Ambiente	Ambiente	NO
	Base	Maggiore	Minore	Ambiente	Ambiente	
17°	Alto	Minore	Minore	Maggiore	Ambiente	
	Centro	Media	Media	Media	Ambiente	NO
	Base	Maggiore	Maggiore	Maggiore	Ambiente	
19°	Alto	Minore	Minore	Maggiore	Ambiente	
	Centro	Media	Media	Media	Ambiente	NO
	Base	Maggiore	Maggiore	Media	Ambiente	
21°	Alto	Minore	Minore	Minore	Maggiore	
	Centro	Media	Media	Media	Maggiore	SI
	Base	Maggiore	Maggiore	Maggiore	Maggiore	
30°	Alto	Minore	Minore	Minore	Maggiore	
	Centro	Media	Media	Maggiore	Maggiore	SI
	Base	Maggiore	Maggiore	Media	Maggiore	

Alto misurazione effettuata ad un'altezza di 270 mm dal pavimento della trincea
Centro misurazione effettuata ad un'altezza di 140 mm dal pavimento della trincea
Base misurazione effettuata ad un'altezza di 10 mm dal pavimento della trincea

getico), mentre nel secondo caso, del coinvolgimento dei gas ad una temperatura adeguata (backdraft), ma che formavano con l'aria una miscela troppo ricca per accendersi e quindi al di fuori del campo di infiammabilità (in deficit chimico). Entrambi i fenomeni possono raggiungere velocità tali da essere considerati esplosivi.

Ulteriori applicazioni

L'“effetto trincea” (Trench Effect), è dunque un fenomeno che può caratterizzare le combustioni che avvengono lungo superfici inclinate, non solo quelle rappresentate da scale o scale mobili ma anche quelle che si possono incontrare in contesti industriali, negli in-



Flussi d'aria in Piccadilly e in VictoriaLine

cendi di coperti in legno o in terreni impervi. L'analisi della propagazione degli incendi boschivi sui ripidi pendii era già stata oggetto di studi soprattutto in Australia (ad opera di McArthur), e Canada (Van Wagner); si erano tuttavia evidenziati i limiti del metodo induttivo utilizzato, il "McArthur Forest Fire Danger Rating System" (1967), secondo il quale la velocità di propagazione dell'incendio raddoppia per ogni aumento di 10° della pendenza topografica, nonché della seguente equazione proposta da Noble (1980), utilizzata in mancanza di modelli più appropriati anche per pendenze superiori ai 20° .

$$R_s = R_0 \exp(0,069 S)$$

dove

R_s è il tasso di propagazione dell'incendio indotto dalla pendenza

R_0 è il corrispondente tasso di propagazione dell'incendio a livello del suolo

S è la pendenza topografica espressa in gradi.

Il verificarsi di alcuni incidenti mortali occor-

si a Vigili del fuoco in presenza di pendii con pendenze anche costanti ma piuttosto accentuate, o in canyons stretti, dove tali regole empiriche erano state violate e l'incendio aveva bruscamente accelerato, passando da una situazione di apparente possibilità di controllo, per via di una intensità relativamente bassa, a una rapidissima accelerazione, mostrando un comportamento definito di tipo eruttivo ("blow-up" o "flare-up"), anche in assenza di vento, hanno portato gli analisti a considerare l'effetto trincea in presenza di particolari condizioni topografiche all'aperto, in particolare quando il plume lambisce la superficie lungo la quale si verifica la diffusione dell'incendio.

Bibliografia

- Desmond Fennell. Department of Transport. "Investigation into the King's Cross Underground Fire"
- Y. Wu, D. D. Drysdale. "Study of upward flame spread on inclined surfaces"
- Jason J. Sharples, . Malcolm Gill, John W. Dold. "The trench effect and eruptive wildfires: lessons from the King's Cross Underground disaster"