

STUDIO DEGLI INCREMENTI DI DOSE E DELL'INDICE DI MORTALITÀ CAUSATI DA UN INCENDIO E DOVUTI ALLA PRESENZA DELLA PAVIMENTAZIONE

A. Pelliccioni, F. Altavilla

ISPESL-Dipia -Via Fontana Candida,1 – 00040 Monteporzio Catone (Roma)

Sommario

Differenti tipologie di eventi incidentali possono accadere all'interno di un sito industriale. Tali eventi spesso producono, direttamente o indirettamente, radiazione termica. Per le applicazioni industriali, il calcolo dell'intensità della radiazione termica che colpisce una superficie è fatto considerando esclusivamente il contributo della radiazione che colpisce direttamente la superficie. Perciò, per quanto riguarda la modellistica degli incidenti, i contributi dovuti alla radiazione riflessa, assorbita dalla pavimentazione e successivamente da questa riemessa sono di solito trascurati. Questo studio analizza il fenomeno dell'assorbimento e della riemissione dell'energia termica che colpisce una superficie in seguito a un incendio derivante da una pozza. Fra i materiali adottati per realizzare pavimentazioni industriali, sono stati scelti per le simulazioni il cemento e il mattone. Nel caso di eventi incidentali, i risultati hanno mostrato che i due su menzionati contributi di energia termica producono effetti che non possono essere trascurati nella valutazione del rischio e delle distanze di sicurezza ad essa correlate.

Introduzione

Per la valutazione dei rischi connessi a un evento incidentale occorre porre in relazione l'intensità del fenomeno al grado di danno dovuto all'assorbimento di energia da parte del bersaglio investito (che può essere un oggetto o una persona). In caso di rilascio di energia termica, gli effetti sono connessi all'intensità dell'energia emessa e, volendo analizzare gli effetti sugli esseri umani, occorre conoscere il valore dell'intensità di emissione e la durata dell'esposizione alla corrispondente radiazione.

Una misura dell'effetto di una particolare esposizione è il valore della dose (D) legata all'intensità del flusso termico (P) a una distanza r tra la sorgente e la superficie investita. La dose termica è misurata in TDU ed è una misura dell'intensità del fattore che colpisce una data risorsa vulnerabile ed è definita come [1]:

$$D(r) = P(r)^{4/3} t_{\text{fenomeno}}$$

Per lo scopo è stato sviluppato un modello [2] capace di prendere in considerazione il contributo in un volume infinitesimo sia dell'energia diretta incidente che di quella riflessa istantaneamente che riemessa dalla pavimentazione circostante l'impianto (Fig.1). L'energia assorbita e ri-emessa dal pavimento è stata calcolata dall'equazione di Fourier [3]. Le simulazioni inerenti la distribuzione della temperatura nel terreno in seguito ad irraggiamento da incidente, sono state compiute su un spazio bi-dimensionale, avente asse orizzontale (x) ed asse verticale (z). E' stata adottata la seguente equazione del trasporto del calore:

$$\frac{\lambda_h}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Un altro aspetto importante legato allo studio svolto, è stata la valutazione della dose in seguito all'incidente usando sia la trattazione classica che l'incremento dovuto all'introduzione dei nuovi contributi energetici. La dose è connessa alla valutazione del danno sulle persone, che non è sempre lo stesso poiché soggetti diversi reagiscono in modo diverso. Ne consegue che per la valutazione del danno si usa di solito un approccio probabilistico invece di uno deterministico. Una misura quantitativa delle conseguenze sulla salute umana è la stima della perdita di vite, definita dalla funzione Probit. Se si assume che all'interno di una certa popolazione la funzione Probit è una variabile casuale con valore medio 5 e deviazione standard uguale a 1, la funzione di probabilità di perdita di vite IP(r) che è dovuta all'assorbimento di una dose D(r) è data dalla relazione

$$IP(r) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{Y(r)-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

Questa probabilità per gli incidenti può essere calcolata partendo dalla potenza termica che colpisce la superficie e sulla base della corrispondente determinazione della dose.

Il lavoro è consistito nel calcolo degli incrementi di dose e degli indici di mortalità in seguito ad un evento incidentale in presenza di due tipologie di pavimentazione il cui effetto è di riflettere l'energia incidente e rimetterla, apportando degli ulteriori contributi incrementali all'energia.

Prendendo in considerazione esclusivamente effetti non stazionari, connessi strettamente alla durata dell'incendio, sono stati calcolati i contributi di energia sia in assenza di pavimentazione (trattazione classica) che dovuti alla presenza della pavimentazione derivanti sia dalla riflessione istantanea che dai processi di riemissione termica conseguenti ad incrementi di temperatura [2].

Architettura del modello

Per stimare il riscaldamento di una pavimentazione in seguito ad un incidente è stato necessario integrare problematiche diverse. In particolare, si è utilizzata la teoria del corpo nero per valutare i flussi di energia entranti ed uscenti dal terreno, mentre per il calcolo dell'energia termica proveniente dall'incendio di una pozza (Poolfire) si sono adottate le formulazioni di TNO [1]. Inoltre, è stata introdotta una nuova formulazione di due parametri caratteristici del modello (l'albedo ed il tempo di ripristino delle condizioni termiche pre-incidente) [2]. Per lo studio della risposta alle sollecitazioni termiche alle diverse tipologie di pavimento, si sono scelti come materiali di prova il cemento ed il mattone.

Per la simulazione sono stati usati sia l'output del codice Effects2 [4] che la soluzione numerica dell'equazione di Fourier (1). Il modello utilizzato simula una lastra bi-dimensionale la cui lunghezza orizzontale è di 1513.8 metri e la profondità di 0.5m. Questo rettangolo è stato diviso in maglie di dimensioni 34.5m per 0.025m. È stata considerata, inoltre, la temperatura iniziale ad ogni nodo della griglia uguale a 300 K.

La simulazione effettuata riguarda la distribuzione di energia termica proveniente da un incendio a partire dal limite della pozza. Sono stati considerati i casi di una pozza, rispettivamente, di 20 e 40 metri di diametro, ed un incendio causato dallo spargimento dell'intero carico di un serbatoio (7500 kg) contenente benzina. Il codice Effects2 fornisce sia i valori dell'energia rilasciata in seguito all'incendio (Fig.2 e Fig.3) che il tempo di durata dell'incendio corrispondente a 60 sec per la pozza di 40m, e 240 sec per quella di 20m.

Il modello di propagazione della energia termica applicato ai due materiali considerati ha fornito le curve di aumento di temperatura dovuti all'incidente per le due pavimentazioni (Fig. 4 e Fig. 5) e i risultati sono sintetizzati in Tabella 1.

Tabella 1. POOLFIRE: Temperatura e potenza termica alla fine dell'incendio.

POOLFIRE (Ø = 20m). Bordo della pozza (x = 20 m)					
Superficie	T _{max} (°K)	P _{tot*} (W/m ²)	P _{ass} (W/m ²)	P _{rifl} (W/m ²)	P _{riem} (W/m ²)
Cemento	357	14130	10159	3970	664
Mattone	422	14130	10865	3264	1385
POOLFIRE (Ø = 40m). Bordo della pozza (x = 30 m)					
Superficie	T _{max} (°K)	P _{tot*} (W/m ²)	P _{ass} (W/m ²)	P _{rifl} (W/m ²)	P _{riem} (W/m ²)
Cemento	313	13840	10022	3917	392
Mattone	329	13840	10719	3220	511

Come si vede dalla tabella, se si considera una pavimentazione in cemento il modello stima un contributo di energia riemessa E_{riem} di:

- Pozza di 20 m P_{riem} = 664 W m⁻²
- Pozza di 40m P_{riem} = 392 W m⁻²

In caso di pavimentazione in mattone il modello stima un contributo di energia riemessa di:

- Pozza di 20 m P_{riem} = 1385 W m⁻²
- Pozza di 40m P_{riem} = 511 W m⁻²

Tali valori sono abbastanza contenuti tranne per il caso di pozza di 20m e per pavimentazione in mattoni, il cui valore di 1385 W/m² comincia ad essere non del tutto trascurabile. È da notare che nella simulazione si ottiene un incremento di temperatura della pavimentazione di 122°C, in prossimità del bordo della pozza, che è un valore abbastanza significativo. Da tenere in considerazione, tuttavia, che si è in presenza di fortissimi irraggiamenti per elevati tempi di esposizione.

Gli incrementi di temperatura a 10m di distanza dalla pozza per il cemento sono stimati in 57° (pozza di diametro 20m) e in 13° (diametro di 40m)

È interessante notare che è stato introdotto un parametro che fornisce il Tempo di ripristino delle condizioni pre-incidentali, T_{eq} , calcolato attraverso l'equazione [2] sviluppata dagli autori:

$$T_{eq} = \delta(x_0) \sqrt{\left(\frac{T_{eq}}{\gamma(x_0)} \right)} - t_{inc}$$

dove $\gamma(x_0)$ e $\delta(x_0)$ sono dei parametri empirici. Questo tempo, in secondi, è funzione delle caratteristiche della pavimentazione e della tipologia dell'incidente. Per la simulazione effettuata sono stati trovati i valori della Tabella 2.

Tabella 2. Tempi di ripristino (in sec) delle condizioni pre-incidentali ($T_{eq} = 300 \text{ }^\circ\text{K}$)

	POOLFIRE ($\varnothing = 20\text{m}$)	POOLFIRE ($\varnothing = 40\text{m}$)
Superficie	x= 18m	x=30m
Cemento	4218	4832
Mattone	3304	4083

Come si vede, la pavimentazione in cemento, pur scaldandosi di meno, ha una inerzia termica maggiore, ripristinando la temperatura iniziale di 300°K dopo circa 75 minuti contro i 61 dei mattoni. Tale risultato risulta coerente con le caratteristiche termiche dei materiali analizzati, per i quali il mattone, se da una parte si riscalda di più, dall'altra dissipa il calore in minor tempo.

L'ulteriore contributo energetico dovuto alla presenza della pavimentazione produce necessariamente un incremento della dose in accordo con la formula (1). Si è cercato quindi di quantificare sia nella dose che nell'indice di Probit (IP) questo aspetto.

Nelle Tabelle 3 e 4 sono stati forniti i valori di dose come vengono calcolati sia classicamente che usando il nuovo modello per degli incendi da una pozza di 20m e 40m rispettivamente.

Tabella 3: Valori di Dose e IP per Poolfire di 20m

PAVIMENTAZIONE	IN							
CEMENTO								
Distanza (m)		16.2	24.3	32.4	40.5	48.5	56.6	64.7
Tmax cemento (°K)		357.3	334.2	322.5	315.5	311.0	308.0	305.9
Dose classica (TDU)		8198.5	4224.8	2504.5	1598.5	1075.5	753.7	545.4
Dose nuovo modello (TDU)	8	11967.	6242.2	3762.3	2452.2	1692.2	1221.6	914.8
Incremento dose (%)		46.0	47.8	50.2	53.4	57.3	62.1	67.7
IP classico		100.0	92.9	55.0	15.5	2.4	0.0	0.0
IP nuovo modello		100.0	99.3	88.0	53.0	19.2	4.4	0.0
Incremento di IP		0.1	6.9	60.0	242.0	700.0		
PAVIMENTAZIONE	IN							
MATTONE								
Distanza (m)		16.2	24.3	32.4	40.5	48.5	56.6	64.7
Tmax cemento (°K)		422.2	373.2	348.2	333.3	323.7	317.2	312.6
Dose classica (TDU)		8198.5	4224.8	2504.5	1598.5	1075.5	753.7	545.4
Dose nuovo modello (TDU)	3	11903.	6136.0	3678.8	2390.6	1646.6	1187.1	888.1
Incremento dose (%)		45.2	45.2	46.9	49.6	53.1	57.5	62.8
IP classico		99.4	92.9	55.0	15.5	2.2	0.0	0.0
IP nuovo modello		100.0	99.3	86.9	50.8	17.5	3.9	0.0
Incremento di IP		0.6	6.8	58.0	227.7	714.0		

Per ovvi motivi, il calcolo è stato eseguito, in entrambi i casi presi in considerazione, a partire dal bordo della pozza. Per quanto riguarda il riferimento temporale adottato, i risultati ottenuti si riferiscono alla massima esposizione assoluta, ossia corrispondente all'istante in cui l'incendio ha termine.

Nel calcolo inoltre sono state fatte delle ipotesi semplificative che comunque non introducono delle grosse indeterminazioni.

La prima riguarda l'assunzione che i flussi di energia proveniente dall'incendio sono costanti durante tutta la durata dello stesso. Tale ipotesi è verosimile e molto importante, perché da essa deriva che la potenza riflessa dal terreno è anch'essa costante per tutta la durata dell'incendio. Da notare che questa assunzione riguarda i contributi energetici preponderanti (energia diretta e quella riflessa).

La seconda riguarda la potenza termica riemessa, che varia con la temperatura del terreno T_G e, pertanto, non potrebbe a rigore essere considerata costante nel corso del fenomeno. Per ragioni di calcolo, è stata fatta l'ipotesi che la potenza termica riemessa assuma sempre il valore massimo possibile, ossia pari al valore corrispondente al momento in cui il terreno raggiunge la massima temperatura, ossia all'istante in cui l'incendio viene a cessare. In altre parole, nel tempo di durata dell'incendio i flussi dovuti alla emissione di corpo nero sono stati considerati costanti e pari a quelli ottenuti istantaneamente al termine dell'irraggiamento. Tale assunzione, se da una parte semplifica notevolmente il calcolo della dose, dall'altra comporta una leggera sovrastima della stessa, senza peraltro minimamente inficiare le indicazioni del modello. È da tenere, infatti, presente che l'errore che si commette è pari a una frazione decimale del termine σT^4 , il cui valore pieno è di circa 500 Wm^{-2} .

Dalla Tab.3 si può notare come gli ulteriori contributi di energia producono incrementi in percentuale della dose non indifferenti, che vanno da un minimo del 46% in prossimità del bordo della pozza fino al 70% verso l'esterno dell'area interessata dal fenomeno.

Per quanto riguarda l'indice di Probit, le variazioni in percentuale riportate in tabella, indicano incrementi significativi con la distanza. Nelle Figg. 4 e 5, sono riportati i valori calcolati con la formulazione classica e quelli ottenuti applicando il nuovo modello. Appare evidente quanto sia importante tale contributo. Si osserva, infatti, come sono non trascurabili non solo gli incrementi percentuali ma anche i valori assoluti raggiunti dall'indice di Probit. Si osserva, altresì, che classicamente a una distanza di 57 m dal bordo del poolfire l'indice di Probit è stato valutato pari a zero, mentre a quella stessa distanza considerando l'effetto della presenza della pavimentazione determina l'indice di Probit assume un valore, sicuramente non trascurabile, di oltre il 4%.

Tabella 4: Valori di Dose e IP per Poolfire di 40m

PAVIMENTAZIONE IN CEMENTO							
Distanza (m)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
Tmax cemento (°K)	330.7	313.3	308.3	305.5	303.8	302.7	301.9
Dose classica (TDU)	6004.4	2013.0	1099.2	655.5	415.8	277.4	192.6
Dose nuovo modello (TDU)	8487.7	2882.9	1595.7	968.4	627.9	430.1	308.0
Incremento dose (%)	41.4	43.2	45.2	47.7	51.0	55.0	59.9
IP classico	99.1	33.3	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
IP nuovo modello	99.8	60.9	15.8	3.2	0.0	0.0	0.0
Incremento di IP (%)	0.7	82.6	464.3				
PAVIMENTAZIONE IN MATTONE							
Distanza (m)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
Tmax cemento (°K)	367.4	329.2	318.2	312.0	308.2	305.8	304.2
Dose classica (TDU)	6004.4	2013.0	1099.2	655.5	415.8	277.4	192.6
Dose nuovo modello (TDU)	8123.6	2754.9	1524.7	925.5	600.3	411.5	294.9
Incremento dose (%)	35.3	36.9	38.7	41.2	44.4	48.3	53.1
IP classico	99.1	33.3	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
IP nuovo modello	99.9	60.4	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Incremento di IP (%)	0.8	81.3	364.3				

Un dato interessante che emerge è che, essendo la pavimentazione in mattoni più assorbente dal punto di vista energetico rispetto al cemento - o equivalentemente rimettendo in gioco minori quantità di energia istantaneamente – una simile tipologia di pavimentazione industriale produce minori incrementi di dose rispetto a una in cemento.

La scelta del materiale per la realizzazione della pavimentazione attorno ad un sito industriale risulta, quindi, importante per l'ottimizzazione dell'esposizione durante un incidente con rilascio di energia termica.

Analogamente sono state calcolati gli incrementi di dose per una pozza di 40m (Tabella 4). Essendo la durata dell'incendio minore, gli effetti sono meno evidenti rispetto alla precedente simulazione. Tuttavia, si osservano pure qui degli incrementi non trascurabili dell'indice di Probit a circa 20m dal bordo della pozza, passando dal 2.8 a 15 circa (incrementi dell'ordine del 400%). Ovviamente, è da precisare che incrementi così alti in percentuale si verificano per valori bassi dell'indice IP. Anche per questa simulazione viene confermato che una pavimentazione in mattoni minimizzerebbe gli effetti della esposizione alla radiazione termica emessa dall'incendio.

Dalle due simulazioni effettuate, emerge con chiarezza, infine, che le distanze di sicurezza apparirebbero sistematicamente sottostimate dalle attuali modalità di calcolo e quindi, a parità di condizioni, andrebbe tenuto in adeguata considerazione la presenza delle diverse tipologie di terreno per una più adeguata stima delle condizioni di sicurezza e di operatività all'interno di un sito industriale in seguito a un evento incidentale di natura termica.

Conclusioni

Il presente studio ha dimostrato che quando un flusso di energia termica ad alta intensità, conseguente a un evento incidentale sia esso di durata molto breve sia esso di durata più lunga (generalmente un fireball non dura più di 20 sec, mentre un poolfire può durare anche decine di minuti) colpisce una superficie solida, questo determina una modifica alle condizioni termiche della superficie. Tale modifica determina effetti apprezzabili per un certo tempo anche dopo che l'evento si è esaurito.

È stato calcolato che dopo un evento con rilascio di energia termica il sistema rapidamente si riscalda e successivamente tende a raffreddarsi lentamente.

È stato messo a punto, a tali fini, uno specifico modello. In questo lavoro sono riportati i risultati dell'applicazione del modello al caso di due differenti pavimentazioni industriali.

Lo studio dimostra che, quando l'incidente si è concluso (nell'istante nel quale la energia emessa dal punto in cui si è verificato l'incidente e la quota di energia riflessa si sono esaurite), nel volume infinitesimo al di sopra della superficie emittente è disponibile una potenza termica addizionale, ossia la energia riflessa e riemessa dal terreno alla temperatura in quell'istante. Questa quantità di energia, tra i vari casi esaminati, risulta considerevole nel caso di incendio da pozza di 20 m di diametro che accada su un pavimento in mattoni in tal caso la energia riemessa dal pavimento è stata valutata pari a 1385 Wm^{-2} .

Lo studio ha dimostrato, inoltre, che a paragone con le simulazioni che non prendono in esame la influenza del terreno, l'incremento dei flussi di energia inducono contributi aggiuntivi alle dosi di energia assorbita da persone od oggetti eventualmente presenti in prossimità del luogo dell'evento. Questi incrementi raggiungono valori anche superiori al 60% per le pavimentazioni prese in esame.

BIBLIOGRAFIA

- [1] TNO, *Methods for the calculation of physical effects of escape of dangerous materials* (Yellow Book), Committee Prevention of Disasters, Voorburg, The Netherlands (1992).
- [2] Pelliccioni, F Altavilla, S. Berardi., “*Sviluppo di un modello per lo studio del fenomeno di propagazione di energia termica generata da eventi incidentali interessanti impianti industriali*”, VGR2K Convegno Nazionale Valutazione e gestione del rischio negli insediamenti civili ed industriali. Pisa (Italy) 24-26 Ottobre 2000.
- [3] F. P. Incropera, D.P. De Witt, “*Introduction to Heat Transfer*”. John Wiley & Sons (1996).
- [4] EFFECTS2, TNO Institute of Environmental Sciences Department of Industrial Safety, AH Apeldoorn The Netherlands (1996)

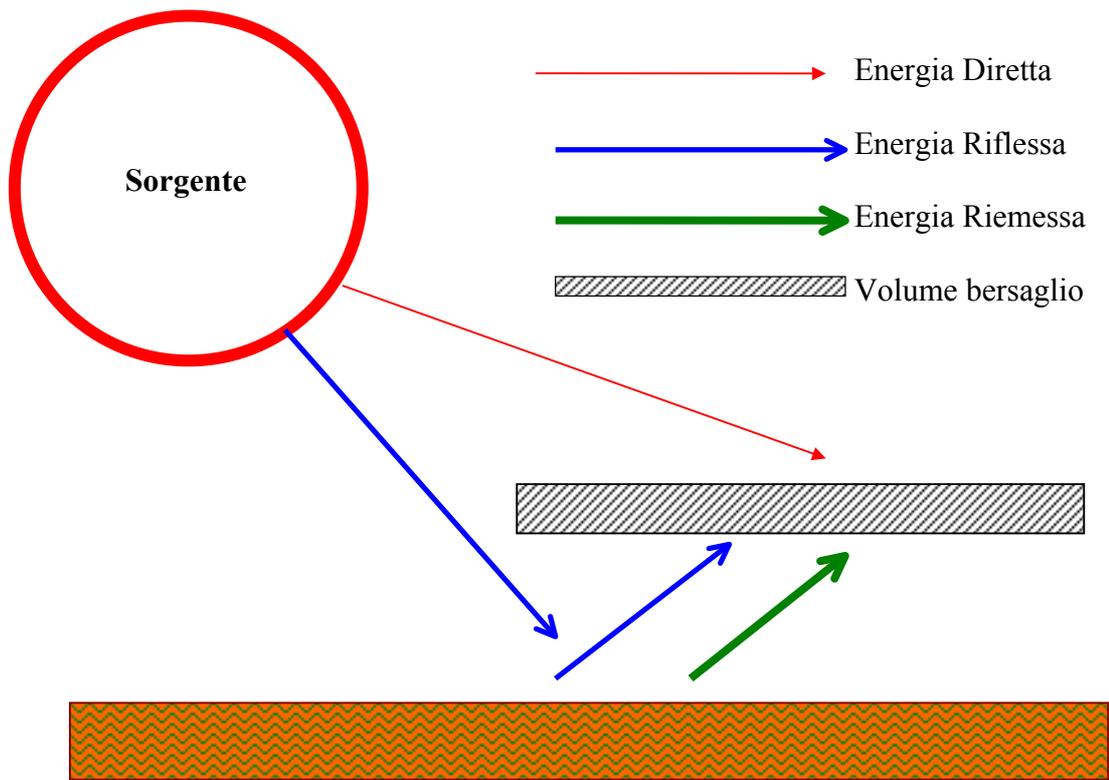


Fig.1 Principali contributi energetici che incidono su un volume bersaglio

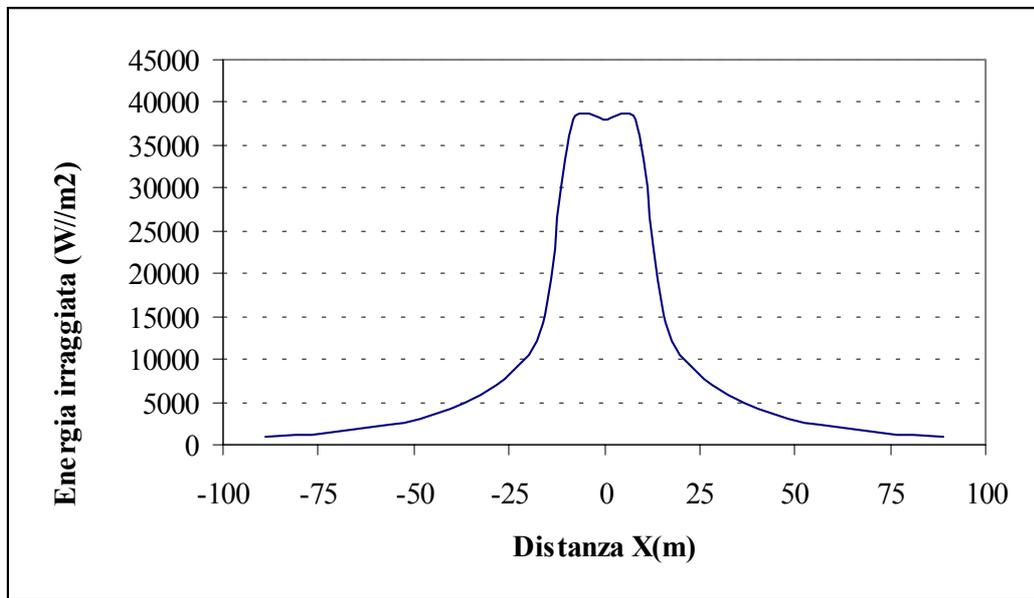


Fig 2. Intensità della radiazione termica in funzione della distanza (POOLFIRE $\varnothing=20\text{m}$)

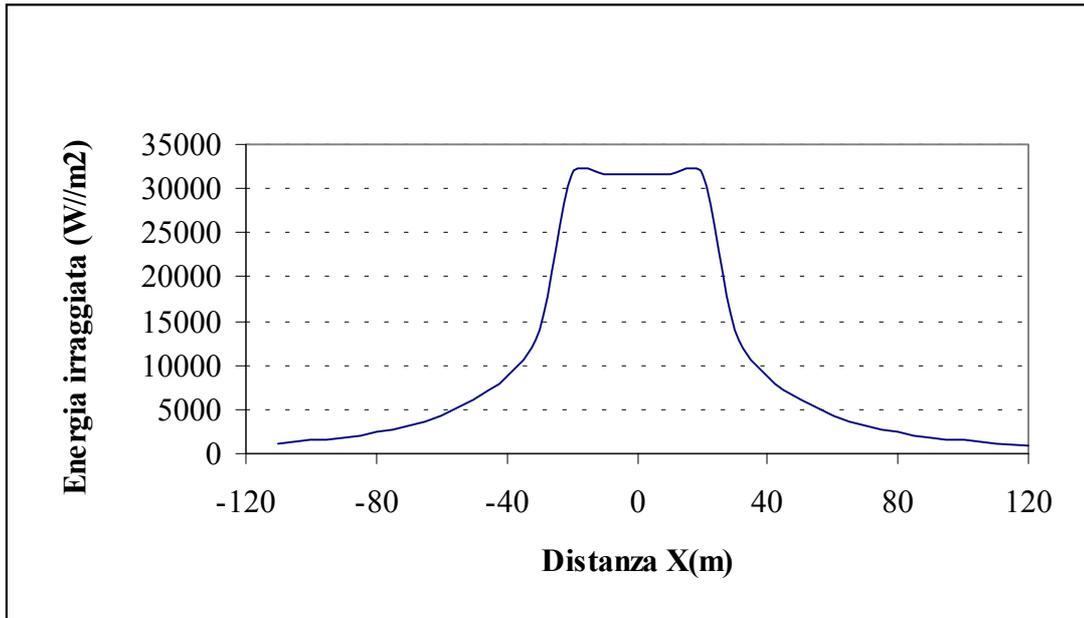


Fig 3. Intensità della radiazione termica in funzione della distanza (POOLFIRE $\varnothing=40m$)

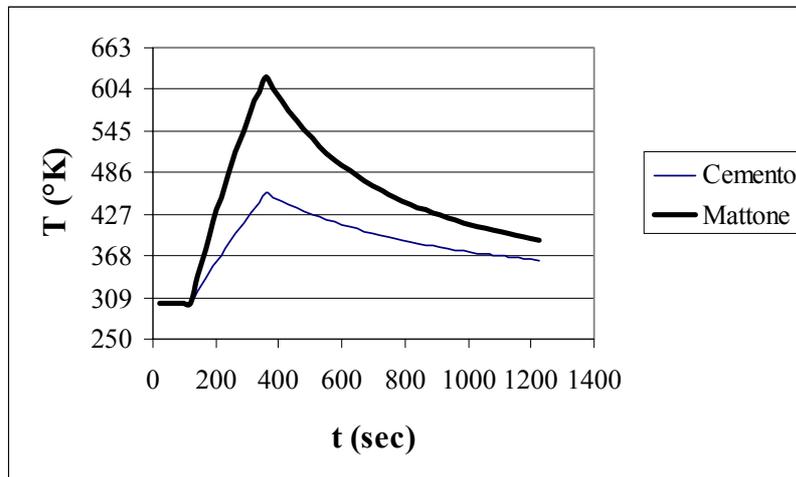


Fig. 4. POOLFIRE (20m): Temperature temporal trend outside of pool (x=20m)

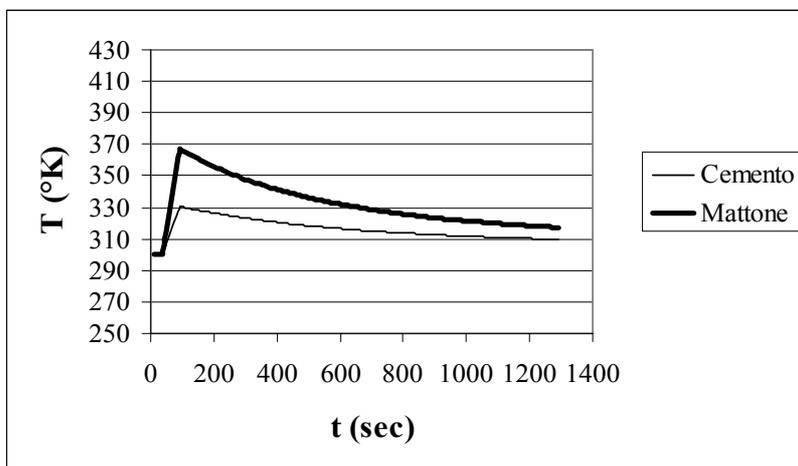


Fig. 5. POOLFIRE (40m): Temperature temporal trend outside pool (x=30m)

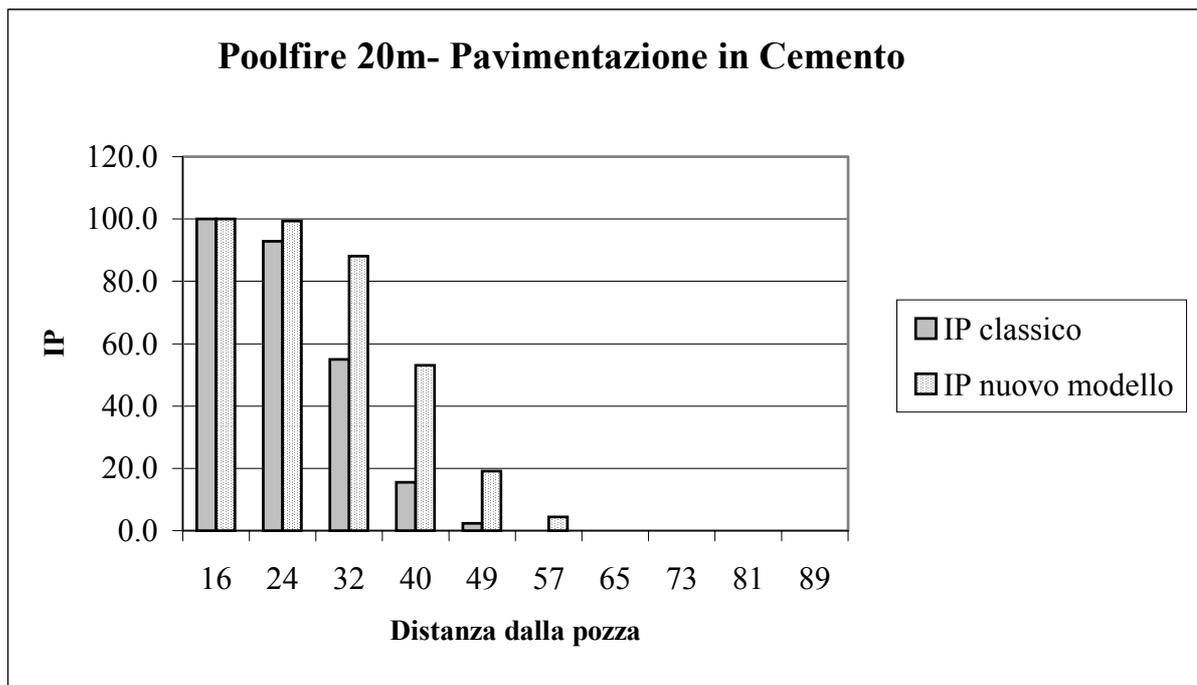


Fig. 6: Trend dell'indice di Probit IP con la distanza per un Poolfire relativo ad una pozza di 20m ed una pavimentaizone in cemento

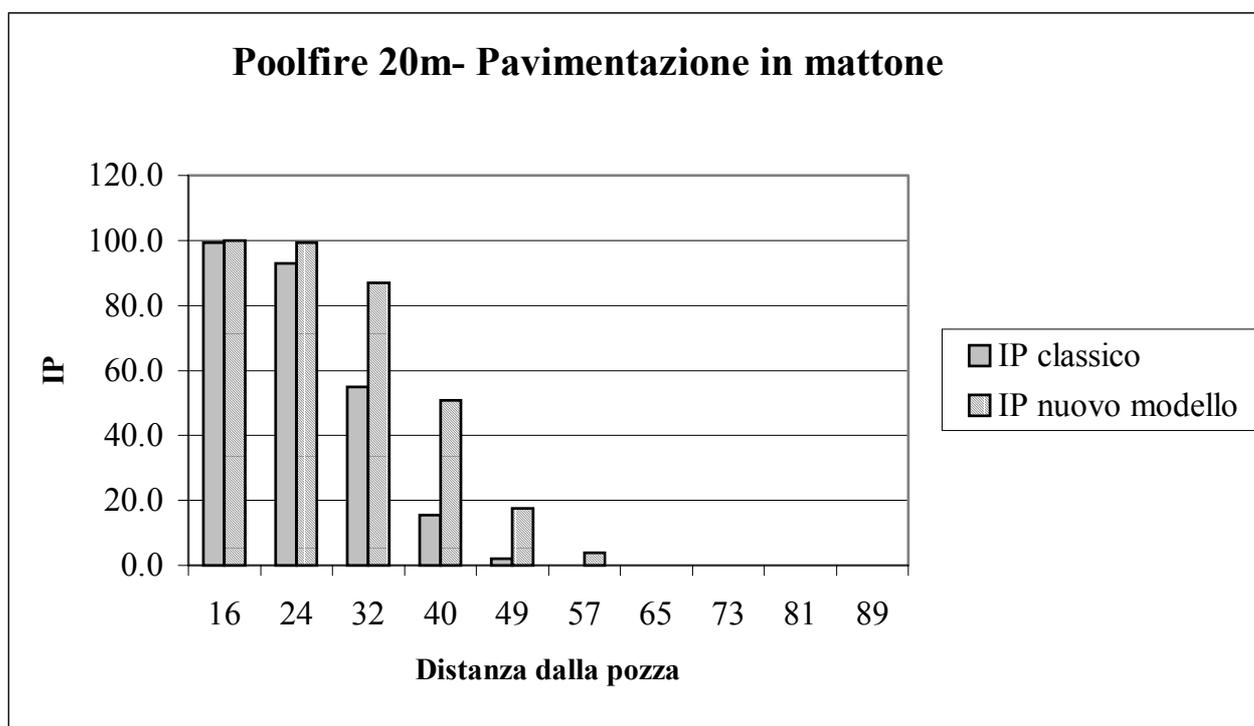


Fig. 7: Trend dell'indice di Probit IP con la distanza per un Poolfire relativo ad una pozza di 20m ed una pavimentazione in mattoni