

SVILUPPO DI UN MODELLO PER LO STUDIO DEL FENOMENO DI PROPAGAZIONE DI ENERGIA TERMICA GENERATA DA EVENTI INCIDENTALI INTERESSANTI IMPIANTI INDUSTRIALI

A. Pelliccioni, F. Altavilla, S. Berardi

ISPESL - Dipartimento Insempiamenti Produttivi ed Interazione con l'Ambiente
Via Fontana Candida, 1 – 00040 Monteporzio Catone (Roma)

SOMMARIO

All'interno di uno stabilimento industriale possono verificarsi diverse tipologie di eventi incidentali. In molti casi tali eventi generano, direttamente o indirettamente, radiazioni termiche, che sono spesso di notevole intensità e con evoluzione spazio-temporale di tipo stazionario o variabile (incendio, BLEVE-*fireball*), tali da provocare danni rilevanti sia per l'uomo che per le strutture coinvolte.

Il calcolo della potenza termica che investe una generica superficie, posta ad una data distanza dalla sorgente, viene generalmente condotto tenendo conto solo del contributo della radiazione diretta. Nei modelli incidentali, quindi, vengono trascurati i contributi aggiuntivi dovuti alla radiazione riflessa ed a quella assorbita e riemessa successivamente dal terreno.

Nel presente lavoro, è stato realizzato un modello numerico in grado di valutare gli effetti termici su una generica superficie in seguito ad un BLEVE, tenendo in considerazione i tre contributi di radiazione sopra descritti.

1. INTRODUZIONE

Il presente studio analizza il fenomeno dell'assorbimento e della riemissione di energia termica, che investe una superficie, in seguito a un evento incidentale. Si è studiato, in particolare, il caso di un fenomeno di un Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE). È noto che un BLEVE [1] può avere luogo nel caso in cui un serbatoio contenente un combustibile (in fase gassosa o liquida) veda un indebolimento del suo guscio esterno fino al verificarsi di una rottura in seguito a un intenso riscaldamento esterno.

Se il liquido è infiammabile si può registrare la formazione di un *fireball*. La radiazione termica che ne deriva è sempre molto intensa e, ancorché il fenomeno sia di breve durata, può provocare, in un raggio di diverse centinaia di metri dal punto in cui si verifica l'evento, anche gravissimi effetti sia in termini di perdita di vite umane che di danni materiali.

La conoscenza della quantità dei flussi di energia rilasciata dall'evento permette una stima delle conseguenze fisiche sulle cose o fisiologiche sulle persone.

In letteratura, si definisce, come elemento caratteristico descrittivo degli effetti dannosi del BLEVE e parametro utile per l'adozione degli interventi di contenimento e di salvaguardia, la distanza di sicurezza, che è collegata alla intensità della radiazione termica emessa e ai limiti di rischio. Tale distanza può essere definita, relativamente ai danni fisiologici o materiali, come il limite entro il quale, a causa del possibile verificarsi di un evento incidentale, il danno fisiologico indotto a un individuo possa considerarsi letale, irreversibile o recuperabile, oppure come l'area entro la quale conviene non insediare stabilmente edifici, impianti o semplicemente macchine per evitare, in caso di incidente, che aumentino sensibilmente i danni alle cose provocati dall'evento.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, sono stati adottati dalla Protezione Civile italiana [2] i limiti di rischio per due diverse tipologie di incidente (Tab.1).

Confrontando le conseguenze dell'incidente in termini di potenza irradiata per unità di superficie alle diverse distanze sul terreno e gli effetti riportati in Tab.1, si possono definire le distanze di sicurezza legate alle conseguenze dell'evento considerato.

Le distanze di sicurezza così calcolate sono valide comunque per il tempo di durata dell'esplosione, e non tengono conto dei contributi energetici dovuti sia alla riflessione del terreno che al fenomeno dell'assorbimento e riemissione dello stesso.

Relativamente alle due tipologie di incidente sopra indicati, la Protezione Civile considera due distinti criteri legati a due tipologie di incidenti: uno impulsato e di breve durata (fenomeno non stazionario) e l'altro costante nel tempo (fenomeno stazionario). Il primo caso fa riferimento al concetto di dose e i limiti sono espressi in unità di $J m^{-2}$. Il secondo fa riferimento al concetto di flusso di energia termica ed i limiti sono espressi in $W m^{-2}$. Se per convenienza si deve passare dall'una all'altra unità di misura occorre fare ricorso alla durata temporale del fenomeno. Ad esempio, nel caso di un *fireball* prodotto da un BLEVE, la dose di

sicurezza è considerata pari a 125 kJ m^{-2} . Tale dose corrisponde ad un flusso di 12.5 kW m^{-2} per un BLEVE della durata di 10 secondi.

Nella valutazione degli effetti termici conseguenti a un incidente si prende, di solito, in considerazione la potenza radiante che raggiunge direttamente un bersaglio posto a una certa distanza dal luogo dell'evento. Inoltre, si considera tale flusso come esaustivo del fenomeno, trascurando sia il contributo dell'energia riflessa dal terreno che quella parte di energia assorbita da quest'ultimo e successivamente riemessa.

Tale assunzione è da ricondursi alla tendenza dell'osservatore a ritenere l'entità del danno rigorosamente legata sia alla durata del fenomeno che ai soli effetti provocati dall'irraggiamento diretto.

Lo studio ha evidenziato, invece, che una energia termica di forte intensità, che colpisce una superficie in un pur breve intervallo di tempo (che per un BLEVE in genere non supera i 20 secondi), produce una alterazione del regime di temperatura superficiale che si prolunga ben oltre il tempo dell'esplosione. Si può dire che, in seguito all'esplosione, il sistema vede innalzare la sua temperatura repentinamente per poi raffreddarsi lentamente. Il modello numerico elaborato è in grado di simulare tale fenomeno. Il presente lavoro, riporta i risultati ottenuti dall'applicazione su differenti superfici di suolo.

2. PRINCIPALI ASSUNZIONI TEORICHE

In questo articolo, grande enfasi è stata data allo studio del trasferimento del calore, necessario per la predisposizione del modello numerico.

Sono in seguito riportati i criteri, le assunzioni e le formulazioni teoriche adottate per definire la risposta termica del suolo a seguito di un evento incidentale non stazionario.

Per valutare tali effetti sul suolo occorre interconnettere diversi argomenti. Lo studio riguarda, infatti, aspetti legati al calcolo sia della radiazione emessa da un corpo nero che della soluzione dell'equazione di trasmissione del calore per irraggiamento.

2.1 Calcolo della potenza da corpo nero

La superficie di ogni corpo, posta a una temperatura T superiore allo 0 K , ha la proprietà di emettere radiazioni elettromagnetiche in tutte le direzioni. In particolare, lo spettro di potenza radiante emesso da una superficie a temperatura T (K) è dato dalla legge enunciata da Planck [3]:

$$W(\lambda) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

Integrando su tutte le lunghezze d'onda, si ottiene la legge di Stefan-Boltzman:

$$W = \int_0^{\infty} W(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2)$$

dove σ è la costante di Boltzman. Tale espressione rappresenta la potenza radiante complessiva, in W m^{-2} , su tutto lo spettro.

Il massimo della potenza è determinato dalla Legge di Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{2890}{T} \quad (3)$$

che fornisce la lunghezza d'onda (in μm) corrispondente al massimo di emissione.

La teoria di corpo nero risulta fondamentale per valutare i flussi di energia che entrano o escono dal terreno. Per quanto riguarda i flussi entranti, verranno considerate tre tipologie di situazioni: irraggiamento solare, da incidente e dall'aria. Da un punto di vista più rigoroso, non sarebbe stato corretto considerare esclusivamente l'evento incidentale come unica sorgente presente, perché le proprietà di assorbimento dei materiali cambiano a seconda dello spettro della energia incidente.

Inoltre, sotto l'ipotesi di equilibrio termodinamico, si assume che il terreno si raffredderà emettendo una quota di energia legata al coefficiente di assorbimento dello stesso e alla legge di Stefan-Boltzman.

2.2 Calcolo dei flussi di energia provenienti da incidente.

Il modello di calcolo utilizzato è quello della sorgente radiante a superficie finita (surface-source) [4]. In tal caso la potenza radiante ricevuta da una superficie unitaria di suolo è definita da:

$$\dot{q}'' = \tau_a F_v \varepsilon E_t \quad (4)$$

dove τ_a è la trasmissività dell'atmosfera, F_v è il fattore di vista della superficie unitaria rispetto alla sorgente, ε è l'emissività della sorgente radiante, ed E_t è la potenza radiante totale emessa da un corpo nero alla temperatura del *fireball*.

Potendosi un BLEVE trattare come un *fireball* [4], il fattore di vista è dato da:

$$F_v = \left(\frac{r}{x} \right)^2 \cos \vartheta \quad (5)$$

dove r è il raggio del *fireball*, x è la distanza del bersaglio dalla proiezione sul suolo del centro del *fireball* e ϑ è l'angolo tra la perpendicolare alla superficie irraggiata nel punto considerato e la congiungente il punto stesso con il centro del *fireball*.

Il raggio r del *fireball* e la durata t dello stesso sono stimati a partire dalla massa m del combustibile [5]:

$$r = 3.24 m^{0.325} \quad (6)$$

$$t = 0.852 m^{0.26} \quad (7)$$

2.3 Calcolo dell'albedo media

Quando un flusso di energia radiante investe una superficie, parte della radiazione viene assorbita, parte riflessa e/o trasmessa nell'ambiente esterno.

In generale, per il principio di conservazione dell'energia, detto α il coefficiente di assorbimento (assorbanza), β il coefficiente di riflessione (riflettanza) e τ quello di trasmissione (trasmissività), per ogni corpo vale la seguente relazione [6]:

$$\alpha(\lambda) + \beta(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (8)$$

L'energia incidente su di una superficie E_i viene, infatti, ripartita nelle componenti riflessa, assorbita e trasmessa secondo le seguenti modalità:

$$E_a = \alpha(\lambda) E_i \quad E_r = \beta(\lambda) E_i \quad E_t = \tau(\lambda) E_i \quad (9)$$

Questi coefficienti sono funzione della natura chimico-fisica del corpo irraggiato, della rugosità superficiale e della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Per un corpo di spessore infinito, il coefficiente di trasmissione è nullo, cosicché la (8) diviene:

$$\alpha(\lambda) + \beta(\lambda) = 1 \quad (10)$$

Ogni superficie è, quindi, caratterizzata, in maniera univoca, dal proprio spettro di riflettanza $\beta(\lambda)$. Questo può essere determinato per via sperimentale [7] facendo uso di spettroradiometri operando in diversi intervalli spettrali. In Fig.1 sono mostrati alcuni tipici spettri di materiali solitamente utilizzati per pavimentazioni industriali [8].

Per il calcolo dei flussi di energia dovuti ad eventi incidentali, in realtà interessa poco la risposta del sistema per ogni singola lunghezza d'onda. Infatti, la radiazione che incide sul terreno (che in prima approssimazione può essere derivata da uno spettro di corpo nero ad una determinata temperatura) contiene i contributi su tutte le frequenze. Ne deriva la necessità di calcolare dallo spettro $\beta(\lambda)$ la risposta integrale della superficie su tutte le lunghezze d'onda, ossia l'albedo. L'albedo è definita come il rapporto tra l'energia elettromagnetica riflessa o diffusa da una superficie e l'energia totale incidente su di essa [7].

Si è definita l'albedo (a) per una superficie la seguente espressione, nella quale vengono utilizzati gli spettri di riflettanza sperimentali:

$$a = \frac{\int_0^{\infty} \sum_k^N W(\lambda; T_k) \beta(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \sum_k^N W(\lambda; T_k) d\lambda} \quad (11)$$

dove $W(\lambda; T_k)$ è lo spettro di emissione delle sorgenti incidenti a temperatura T_k derivato dalla legge di Planck (1). Da notare che l'integrale è esteso tra 0 e $+\infty$ solo dal punto di vista teorico; in pratica, lo spettro di radianza assume valori non trascurabili in un determinato intervallo di lunghezze d'onda (nel caso in esame ciò avviene nell'intervallo di λ tra 0.2 μm e 15 μm) e, quindi, l'integrale avrà un valore leggermente differente se calcolato solo all'interno dell'intervallo dello spettro.

Tenendo in considerazione anche lo spettro di emissione per la diversa temperatura delle tre sorgenti ($T=6000\text{K}$, $T=1460\text{K}$, $T=300\text{K}$, corrispondenti alla sorgente sole, evento incidentale e all'aria, rispettivamente), nella Tab. 2 sono forniti i valori dell'albedo derivati dalla (11) per alcune tipiche superfici. Da osservare che i massimi raggiunti dalle potenze alle tre temperature applicando la (3) si verificano per 0.48 μm , 1.98 μm e 9.63 μm , rispettivamente per la sorgente sole, incidente e aria.

I dati sono stati calcolati valutando essenzialmente due situazioni di irraggiamento:

- lo spettro di riferimento contiene (incidente) o non contiene (fondo) l'evento incidentale;
- lo spettro di riferimento contiene (giorno) o non contiene (notte) quello solare.

Inoltre, altre due situazioni, legate a questioni numeriche, sono state considerate a seconda del dominio di integrazione della (11):

- Totale: gli estremi delle lunghezze d'onda sono 0 e ∞ ;
- Parziale: gli estremi delle lunghezze d'onda sono λ_{\min} e λ_{\max} .

Dalla tabella si nota come i valori di albedo per le superfici in esame sono maggiormente influenzati dallo spettro solare rispetto agli altri fattori.

2.4 Calcolo dell'equazione del trasporto del calore

Per valutare la risposta termica del terreno in seguito ad una sollecitazione energetica, occorre individuare un modello idoneo a descrivere il sistema.

Innanzitutto, occorre fare alcune assunzioni esemplificative che aiutano, da una parte, a rendere più semplice possibile la descrizione della dinamica del sistema e, dall'altra, a rendere più aderente alla realtà il formalismo matematico usato.

Una prima approssimazione di natura geometrica consiste nel fatto che il fenomeno incidentale studiato (BLEVE) possiede un asse di simmetria ortogonale e centrato sul suolo nel punto in cui avviene l'incidente. L'effetto termico lungo due direzioni ortogonali sul terreno, in ottima approssimazione, può essere ottenuto tramite la rotazione di una simulazione monodimensionale.

Una seconda approssimazione, collegata alle caratteristiche fisiche del sistema (la capacità termica (c_p), la densità (ρ), la conducibilità termica (λ_h)), consiste nell'assumere come costanti tali grandezze. Questa approssimazione di fatto può essere quella più critica per i risultati perché è noto che queste grandezze variano con la temperatura. Però, sotto l'ipotesi che le quantità di calore fornite a sistema non siano sufficienti a determinare rilevanti variazioni nel comportamento fisico dei materiali, tale approssimazione può essere ragionevolmente accettata. Rimane comunque la necessità di adeguare il modello a caratteristiche fisiche variabili con la temperatura, soprattutto per la simulazione di eventi molto intensi.

Infine, si assume che la superficie irraggiata abbia una composizione chimico-fisica omogenea.

Sulla base delle approssimazioni, si è considerata la simulazione su un grigliato bidimensionale avente asse orizzontale x e verticale z . Per calcolare il trend della temperatura di un corpo in seguito ad irraggiamento, si è risolta l'equazione del trasporto del calore di Fourier [9]:

$$\frac{\lambda_h}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

La modalità di trasmissione del calore per irraggiamento corrisponde a fornire i flussi di calore nel volume considerato e questo equivale, dal punto di vista matematico, ad adottare le condizioni di Neumann come condizioni al contorno [9]. Tali condizioni sono contrapposte a quelle di Dirichelet che regolano, invece, la trasmissione del calore per contatto.

I flussi di calore Φ_s entranti verso la superficie regolano i gradienti di temperatura all'interfaccia tramite la seguente equazione:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\Phi_s}{\lambda_h} \quad (13)$$

dove λ_h è la conducibilità termica del sistema. Questa equazione risulta fondamentale per risolvere l'equazione di Fourier al contorno.

Per trovare la soluzione della equazione (13) è stato utilizzato lo schema alle differenze finite [9]. Gli errori di troncamento, legati alla discretizzazione, sono stati ottimizzati per risolvere le derivate spaziali e temporali tramite l'adozione di una soluzione centrata per la stima delle derivate continue.

In definitiva, la soluzione numerica ottenuta risulta ottimizzata e coerente su tutto il grigliato di simulazione e viene, comunque, assicurata la convergenza dell'algoritmo.

2.5 Calcolo del tempo per il raggiungimento della Temperatura di pre-incidente

Una questione interessante riguarda i tempi caratteristici dopo i quali i sistemi irraggiati ritornano in condizioni pre-incidentali. Infatti, considerando il riscaldamento e il successivo raffreddamento del suolo in seguito ad un incidente, la temperatura in un determinato punto varia con il tempo in maniera decrescente.

Un parametro che è stato calcolato è il tempo che deve trascorrere affinché la temperatura del terreno ritorni al suo valore prima dell'incidente. In generale, questo parametro dipende, in maniera complessa, sia dalle caratteristiche fisiche del terreno che dalle condizioni al contorno legate ai flussi. Ne consegue che non è possibile ottenere i tempi di ripristino del terreno direttamente dalla simulazione, a meno di aspettare tempi di calcolo lunghissimi. Una ipotesi ragionevole, che è stata assunta per il raffreddamento del terreno, è che questo si raffreddi con una legge di tipo polinomiale:

$$T(x_0; t) = \gamma(x_0) t^{\delta(x_0)} \quad (14)$$

dove $\gamma(x_0)$ e $\delta(x_0)$ sono dei parametri empirici da calcolare in un punto x_0 seguendo l'andamento decrescente temporale della temperatura derivante dalla simulazione. Una volta determinati questi parametri, si inverte l'equazione (14), ottenendo:

$$t_{eq} = \delta(x_0) \sqrt[\delta(x_0)]{\ln\left(\frac{T_{eq}}{\gamma(x_0)}\right)} - t_{inc} \quad (15)$$

dove t_{eq} è il tempo impiegato dal terreno per riportarsi alla temperatura T_{eq} e t_{inc} la durata dell'incidente. Se T_{eq} coincide con la temperatura pre-incidente tale tempo esprime i secondi che devono trascorrere affinché si ristabiliscano le condizioni iniziali.

E' interessante notare come la (15) può essere usata anche per valutare dopo quanto tempo un terreno, per effetto di un incidente, raggiunge un determinato valore di temperatura tale da non produrre danni a persone o a cose. Un aspetto rilevante, a tal riguardo, potrebbe essere la determinazione dei tempi per un accesso sicuro alle aree colpite dagli incidenti.

3. STRUTTURA E APPLICAZIONE DEL MODELLO

La struttura del modello predisposto si articola secondo tre moduli fondamentali.

Il primo modulo calcola l'albedo della superficie esposta al flusso di energia (11), proveniente da una o più sorgenti, e richiede in ingresso lo spettro di emissione caratteristico della superficie medesima e la temperatura delle sorgenti (sole, aria o/e evento incidentale).

Il secondo modulo richiede in ingresso il valore dell'albedo, le proprietà fisiche della superficie colpita (c_p , ρ e λ_h) e la potenza termica incidente sulla stessa; questo modulo, risolvendo l'equazione (12), fornisce la frazione di energia riflessa dal terreno, l'energia assorbita e successivamente riemessa e la distribuzione spazio-temporale della temperatura.

Il terzo modulo calcola il tempo richiesto dal sistema per ripristinare le condizioni termiche pre-incidentali (15). A tal fine sono richieste in ingresso le temperature T_{eq} , i parametri γ e δ e l'istante al quale inizia l'incidente.

L'applicazione del modello ha riguardato lo studio e la determinazione delle sollecitazioni termiche indotte su un suolo realizzato in differenti tipologie di pavimentazione, a seguito di un evento di irraggiamento impulsato.

A partire da una situazione omogenea della temperatura del terreno e dalle sue caratteristiche, con il modello è possibile valutare la distribuzione della temperatura verticalmente in profondità. Tali potenze sono state determinate considerando un sistema in equilibrio termico con l'ambiente. Al flusso di fondo si aggiunge, per la durata del fenomeno, il flusso termico variabile proveniente dal *fireball*.

3.1 Caso studio: Effetti termici da un BLEVE

Come incidente si è considerato il caso di un BLEVE che, esplodendo da un serbatoio contenente 25.000 kg di gas propano liquido in pressione, ne libera 10.000 kg circa. La potenza termica generata da questa esplosione è stata calcolata secondo la formulazione del TNO [4] sviluppata nel codice Effects2 [10]. La durata dell'esplosione, calcolata dalla (7), risulta essere di 9.34 secondi. È stato calcolato il valore della potenza termica incidente al suolo risolvendo la (4) (Fig. 2). La potenza incidente sull'unità di superficie è pari a circa 49 kW m⁻² nell'area immediatamente sottostante il *fireball* (dove x = 0.0 m) e scende abbastanza rapidamente con l'allontanarsi da tale area.

Utilizzando i dati di output forniti dall'Effects2 si è risolta l'equazione del calore di Fourier (12) secondo un modello di suolo bidimensionale (avente una lunghezza massima orizzontale di 1513.8 m ed una profondità di 0.5 m). Il rettangolo così determinato è stato suddiviso in maglie di dimensioni di 34.5 m lungo x e di 0.025 m lungo z. La temperatura iniziale in ogni punto del reticolo è stata posta, per convenzione, pari a 300 K. Sono stati presi in considerazione alcuni tra i principali materiali generalmente adottati come pavimentazione o possibilmente presenti nell'area investita dall'incidente (asfalto, acqua, calcestruzzo, mattoni, basalto, granito). Sono stati utilizzati come parametri di ingresso al modello le caratteristiche fisiche [11] della Tab. 3 e i valori di albedo evidenziati in Tab. 2.

È stato rilevato che, a seguito dell'esplosione, la massima temperatura, in qualsiasi punto dell'area interessata dal fenomeno e per qualsiasi superficie, viene raggiunta al termine del *fireball* (t = 10 s). Successivamente (t > 10 s), si ha il raffreddamento della superficie dovuto ai flussi termici uscenti dalla stessa. Risolvendo l'equazione (12) si sono trovate le soluzioni numeriche relative al problema in esame. Nelle Figg. 3 e 4 sono evidenziati, per i diversi materiali, gli andamenti temporali della temperatura in corrispondenza a due punti di riferimento posti sul suolo, uno in corrispondenza dell'asse del BLEVE (x=0.0 m) e l'altro esterno al raggio del *fireball* (x=65.0 m).

Dalle figure si evidenziano comportamenti abbastanza usuali, come il decremento della temperatura con la distanza, il suo innalzamento repentino dovuto all'esplosione e il successivo decremento temporale, con un trend comunque non simile per tutti i tipi di pavimentazione considerati.

In Tab. 4 sono elencati - per i due punti di riferimento e per ogni materiale - la temperatura massima raggiunta (T_{max}), la potenza incidente il terreno (P_{tot}), la potenza assorbita (P_{ass}), la potenza riflessa (P_{rif}) e la potenza riemessa dal terreno al termine del *fireball* (P_{riem}). Quest'ultima viene calcolata da:

$$P_{riem} = (1 - a) \sigma T_{max}^4 \quad (16)$$

Un aspetto interessante, che deriva dalla simulazione, risiede nella risposta termica abbastanza differenziata di alcuni materiali benché le caratteristiche fisiche non siano molto diverse. Questo avviene, per esempio, per l'asfalto e i mattoni: infatti, benché per essi i valori di c_p, ρ e λ_h differiscano mediamente per circa il 12%, la temperatura massima raggiunta dai due materiali differisce di circa 9 K. In realtà, il parametro più importante da considerare in questo caso è l'albedo, il cui valore per i mattoni è di 0.241 mentre per l'asfalto è pari soltanto a 0.074. Viceversa, per materiali che hanno valori di albedo simili, come l'acqua e l'asfalto, la risposta termica alla stessa sollecitazione può variare apprezzabilmente, raggiungendosi una temperatura massima per l'acqua di 311 K e per l'asfalto di 335 K.

In definitiva, solo dalla conoscenza simultanea sia delle caratteristiche fisiche del terreno che delle proprietà ottiche dello stesso, è possibile valutare realisticamente il comportamento termico delle strutture alle medesime sollecitazioni. Inoltre, è interessante notare come la potenza riemessa (Tab. 4) possa raggiungere livelli di esposizione non indifferenti (si va dai 530 kW m⁻² fino ai 714 kW m⁻²) e che questo tipo di contributo viene del tutto trascurato con gli approcci teorici tradizionali, per i quali l'esposizione dopo l'incidente non è sempre presa in considerazione.

Un altro aspetto conseguente alla simulazione è il calcolo dei tempi di ripristino delle condizioni pre-incidente. Nel corso della fase di raffreddamento, l'energia assorbita dal suolo viene riemessa all'esterno finché il terreno non avrà raggiunto la sua temperatura di equilibrio, calcolata dalla (15) con T_{eq} = 300 K e γ e

δ determinati numericamente dalla simulazione. Come si evince dalla Tab. 5, gli intervalli temporali entro i quali il suolo raggiunge la temperatura pre-incidente variano a seconda del materiale considerato. Un risultato interessante è che l'asfalto, che si riscalda di più, è anche il materiale che si raffredda abbastanza rapidamente; al contrario, il calcestruzzo presenta circa triplicati i tempi di ripristino rispetto all'asfalto.

4. CONCLUSIONI

Con riferimento ai vari materiali analizzati, le simulazioni eseguite hanno evidenziato che una quota fino al 99% della energia incidente totale viene assorbita dal suolo, che la riemetterà all'esterno gradualmente. Conseguentemente, una quota variabile fino al 28% dell'energia totale incidente viene istantaneamente riflessa.

Si è verificato, inoltre, come una parte dell'energia termica emessa da una sorgente venga assorbita dal terreno e riemessa successivamente all'esterno. Una quota di quest'ultima va a colpire, a seguito di un incidente, un medesimo oggetto emergente dal suolo già investito dal flusso diretto di energia proveniente dall'evento incidentale, costituendo essa stessa una quota di energia integrativa della precedente. In generale, si può affermare che la riflessione e riemissione di energia potrebbero ingenerare un danno aggiuntivo al corpo già investito dalla energia termica diretta. Un fenomeno di questo tipo si rivela spesso interessante anche nello studio dei danni conseguenti a fenomeni incidentali di tipo non-stazionario (come è il caso del BLEVE), nei quali vengano prodotte rilevanti quantità di energia termica ancorché per tempi limitati.

Con successivo approfondimento, si potranno calcolare i contributi provenienti dalle quote di riflessa e riemessa, che effettivamente colpiscono l'ipotetico bersaglio (strutture esterne al terreno, comunque disposte) in funzione del relativo fattore di vista, valutandone i conseguenti danni. Si potranno studiare anche le migliori condizioni di accesso nell'area industriale, luogo dell'incidente, valutando percorsi e tempi ottimali.

Utilizzando la stessa metodologia di indagine, verranno effettuate applicazioni anche per altri tipi di eventi incidentali, come un incendio di tipo stazionario o, ancora, un BLEVE da serbatoio contenente un combustibile diverso dal propano, ecc.

Si avverte esplicitamente che il modello proposto adotta le caratteristiche fisiche dei materiali studiati costanti al variare della temperatura. Tale condizione non corrisponde al reale comportamento delle sostanze. I risultati, quindi, scontano una significativa approssimazione. Il successivo approfondimento considererà tali parametri nella loro effettiva variabilità, a seguito di prove dirette sperimentali in campo, a convalida delle ipotesi e simulazioni del modello approvato.

E' opportuno evidenziare, infine, che i risultati qui esposti sono il frutto di valutazioni di ordine teorico, che sarà necessario validare mediante verifiche sperimentali.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la dottoressa MariaPaola Bogliolo, ricercatrice presso l'ISPESL-DIPIA, per il contributo offerto e per i preziosi suggerimenti dati al presente lavoro.

| FENOMENO FISICO | Elevata letalità | Inizio letalità | Lesioni irreversibili | Lesioni reversibili | Danni a strutture ed effetti domino |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| <u>INCENDIO</u> (radiazione termica stazionaria) | 12.5 kW/m ² | 7 kW/m ² | 5 kW/m ² | 3 kW/m ² | 12.5 kW/m ² |
| <u>BLEVE/Fireball</u> (radiazione termica variabile) | Raggio fireball | 350 kJ/m ² | 200 kJ/m ² | 125 kJ/m ² | Da 100 a 800 m |

Tabella 1. Soglie di danno a persone e strutture per irraggiamento ed esplosioni.

| TIPO DI SUPERFICIE | FONDO (giorno) | | INCIDENTE (giorno) | | FONDO (notte) | | INCIDENTE (notte) | |
|--------------------|----------------|------------|--------------------|------------|---------------|------------|-------------------|------------|
| | a (parziale) | a (totale) | a (parziale) | a (totale) | a (parziale) | a (totale) | a (parziale) | a (totale) |
| ASFALTO | 0.077 | 0.074 | 0.077 | 0.074 | 0.038 | 0.021 | 0.065 | 0.064 |
| CALCESTRUZZO | 0.294 | 0.282 | 0.293 | 0.281 | 0.030 | 0.016 | 0.184 | 0.182 |
| ACQUA | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.016 | 0.008 | 0.015 | 0.015 |
| MATTONI | 0.240 | 0.230 | 0.241 | 0.231 | 0.037 | 0.018 | 0.361 | 0.356 |
| BASALTO | 0.152 | 0.130 | 0.151 | 0.130 | 0.053 | 0.028 | 0.097 | 0.095 |
| GRANITO | 0.202 | 0.194 | 0.202 | 0.194 | 0.105 | 0.056 | 0.152 | 0.150 |

Tabella 2. Valori di albedo per le diverse superfici.

| Tipo di superficie | λ_h (W/m K) | ρ (kg/m ³) | c_p (J/kg K) |
|--------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| ASFALTO | 0.64 | 1300 | 933 |
| CALCESTRUZZO | 1.16 | 2500 | 1134 |
| ACQUA | 0.60 | 1000 | 4184 |
| MATTONI | 0.59 | 1600 | 860 |
| BASALTO | 1.50 | 1900 | 879 |
| GRANITO | 3.20 | 2500 | 879 |

Tabella 3. Caratteristiche fisiche delle diverse superfici.

| t = 10 s ; x = 0.0 m | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------|--|--|--|---|
| Tipo di superficie | T_{max} (K) | P_{tot} (W/m²) | P_{ass} (W/m²) | P_{rif} (W/m²) | P_{riem} (W/m²) |
| ASFALTO | 335 | 48955 | 45332 | 3623 | 714 |
| CALCESTRUZZO | 311 | 48955 | 35150 | 13805 | 530 |
| ACQUA | 311 | 48955 | 48906 | 49 | 530 |
| MATTONI | 326 | 48955 | 37695 | 11260 | 640 |
| BASALTO | 324 | 48955 | 42591 | 6364 | 625 |
| GRANITO | 317 | 48955 | 39458 | 9497 | 573 |
| t = 10 s ; x = 65.0 m | | | | | |
| Tipo di superficie | T_{max} (K) | P_{tot} (W/m²) | P_{ass} (W/m²) | P_{rif} (W/m²) | P_{riem} (W/m²) |
| ASFALTO | 328 | 38920 | 36040 | 2880 | 607 |
| CALCESTRUZZO | 309 | 38920 | 27945 | 10975 | 373 |
| ACQUA | 309 | 38920 | 38881 | 39 | 515 |
| MATTONI | 320 | 38920 | 29968 | 8952 | 461 |
| BASALTO | 319 | 38920 | 33860 | 5060 | 510 |
| GRANITO | 313 | 38920 | 31370 | 7550 | 440 |

Tabella 4. Caratteristiche di Temperatura e Potenza (x=0.0 m; x=65.0 m).

| Tipo di Pavimentazione | t(s) x = 0.0 m | t(s) x = 65.0 m |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ASFALTO | 2349 | 2344 |
| CALCESTRUZZO | 5334 | 5231 |
| ACQUA | 178869 | 180739 |
| MATTONI | 3600 | 3590 |
| BASALTO | 1602 | 1590 |
| GRANITO | 1326 | 1322 |

Tabella 5. Intervalli temporali per il raggiungimento della T_{eq} = 300 K.

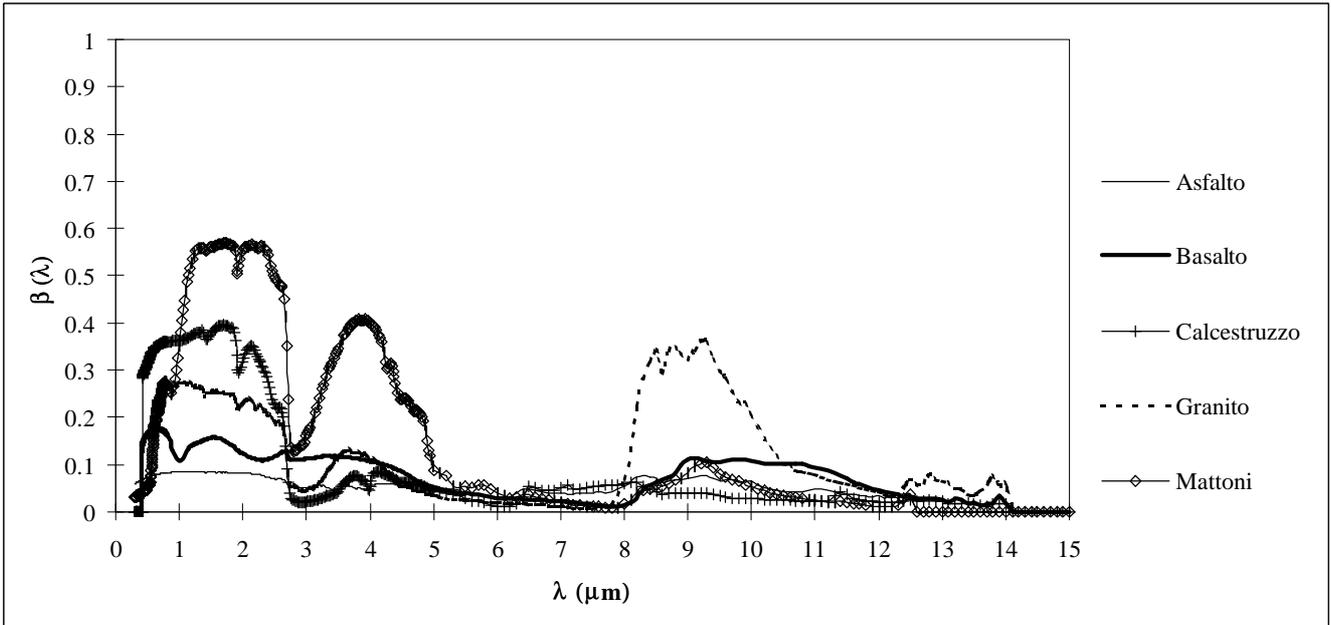


Figura 1. Spettri di riflessione delle diverse superfici.

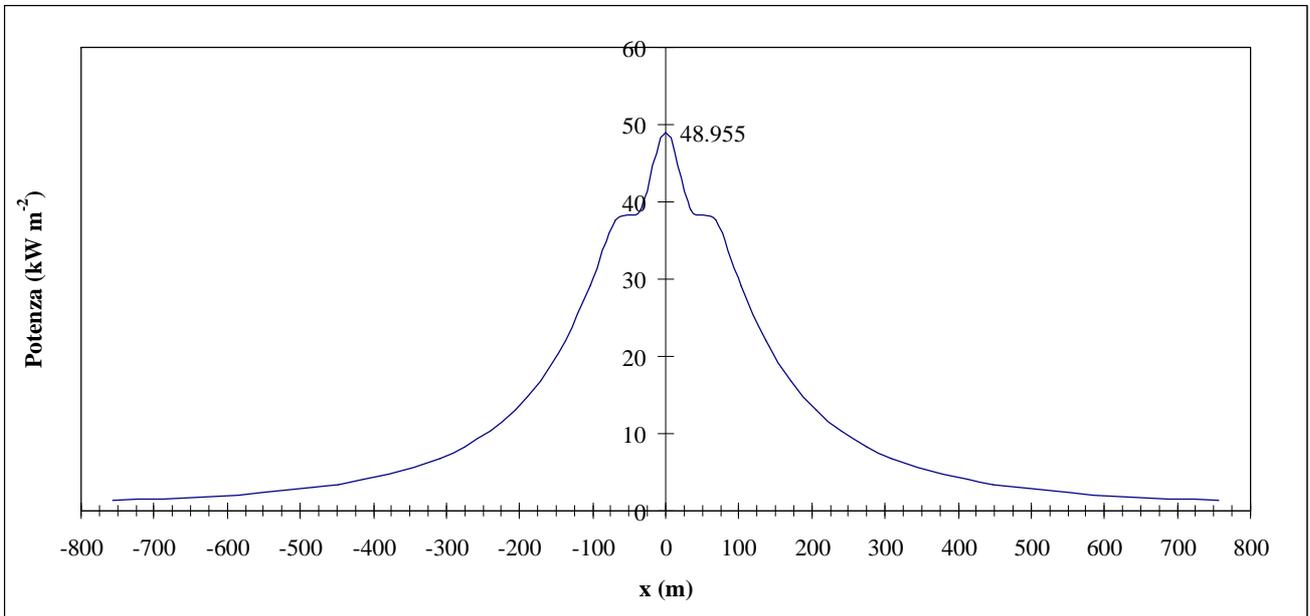


Figura 2. Potenza termica conseguente al BLEVE.

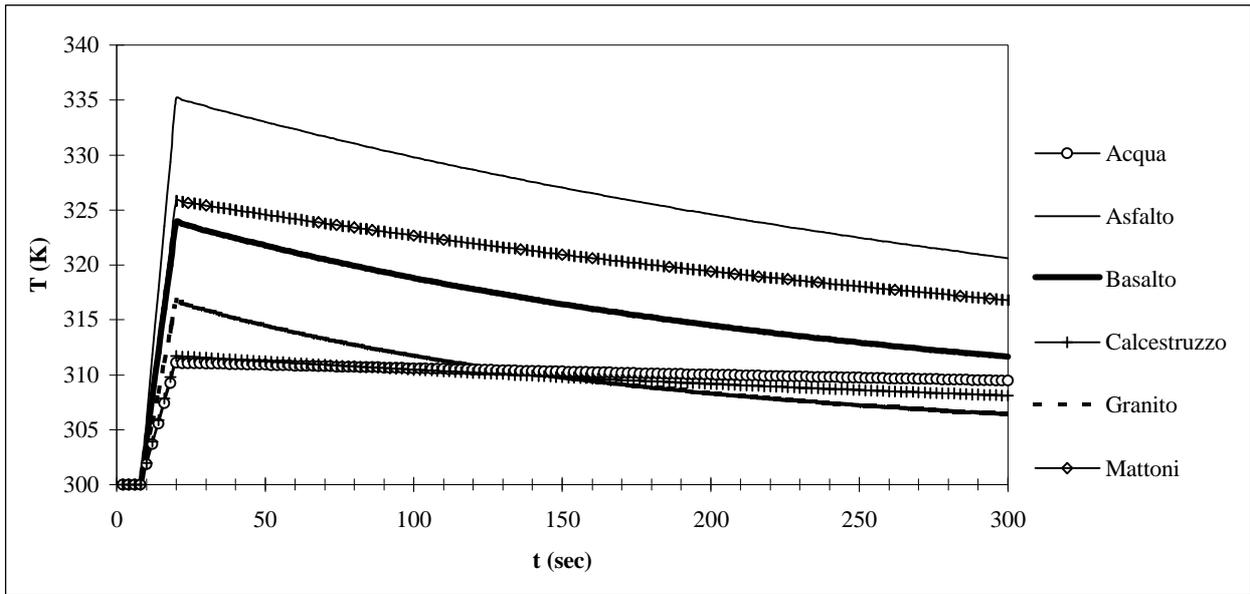


Figura 3. Andamento temporale della temperatura a $x = 0.0$ m.

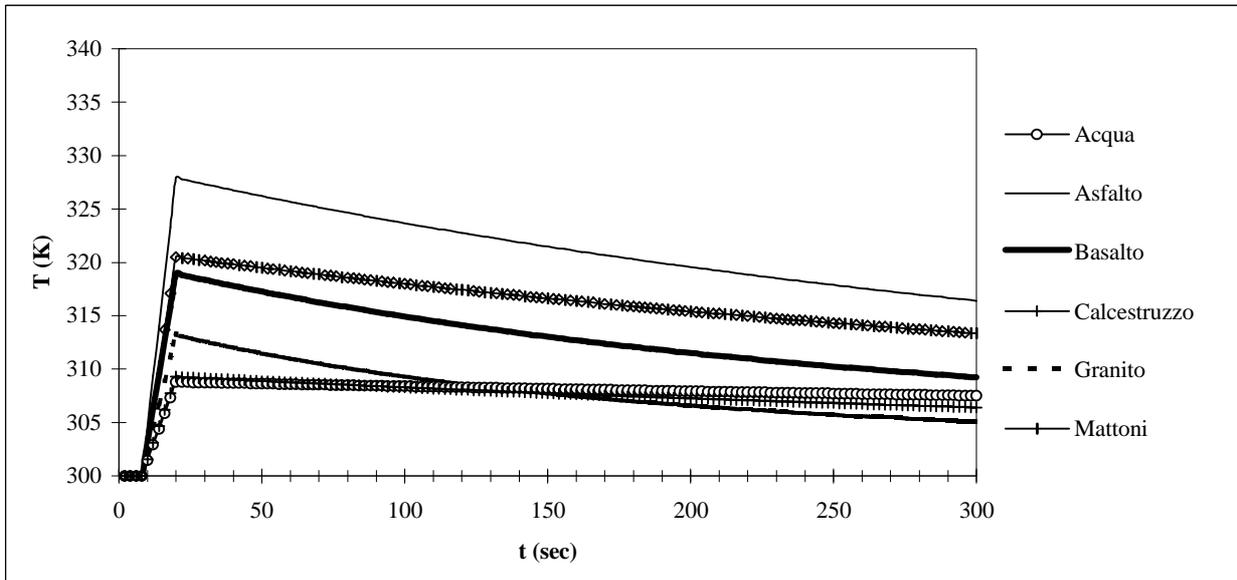


Figura 4. Andamento temporale della temperatura a $x = 65.0$ m.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I.A. Papazoglou, O.N. Aneziris, *Uncertainty qualification in the health consequences of the boiling liquid expanding vapour explosion phenomenon*, Journal of Hazardous Material A67, pp. 217-235 (1999).
- [2] *Pianificazione di Emergenza Esterna per Impianti Industriali a Rischio di Incidente Rilevante* (Linee Guida), Dipartimento della Protezione Civile (1994).
- [3] Incropera, DeWitt, *Introduction to heat transfer*, John Wiley & Sons, Third edition (1996).
- [4] TNO, *Methods for the calculation of physical effects of escape of dangerous materials* (Yellow Book), Committee for the Prevention of Disasters, Voorburg, Netherlands (1992).
- [5] TNO, *Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie, in opdracht van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer* (May 1983), "LPG-Integraal", vergelijkende risico-analyse van de opslag, de overslag, het vervoer en het gebruik van LPG en benzine; report no. 1112.
- [6] L. De Santoli, *Fisica tecnica ambientale*, Volume Secondo, Casa Editrice Ambrosiana (1999)
- [7] Colwell R. N., *Manual of Remote Sensing* (Vol. 1), American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, USA (1983)
- [8] URL:<ftp://rocky.eps.jhu.edu>; URL:<http://asterweb.jpl.nasa.gov/speclib>, Johns Hopkins University Spectral Library
- [9] C.A.J.Fletcher, *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, Second Edition Vol.1, Springer Verlag (1991)
- [10] *EFFECTS2*, TNO Department of Industrial Safety, Holland (1996)
- [11] Nuovo Colombo, *Manuale dell'Ingegnere*, HOEPLI (81° Edizione)