

METODO RAPIDO PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DI RILASCI TOSSICI SULLA POPOLAZIONE

Leonardo G. Luccone, Barbara Mazzarotta, Barbara Silvetti

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana, 18 – 00184 Roma
luccone@ingchim.ing.uniroma1.it

SOMMARIO

Il presente lavoro propone un metodo speditivo (SMETD) per la determinazione dell'impatto sulla popolazione di rilasci di sostanze tossiche. La sua applicazione richiede la conoscenza di un numero limitato di parametri fisici e chimico-fisici caratteristici della sostanza e della tipologia di stoccaggio, convogliamento o lavorazione, e dell'IDLH della sostanza in esame. Attraverso la consultazione di apposite tabelle si individuano immediatamente le equazioni che forniscono il profilo di concentrazione e la percentuale di danno attesa in funzione della distanza per diverse tipologie di rilascio. Il metodo proposto prevede anche la possibilità di individuare zone a diverso grado di rischio intorno allo stabilimento, ai fini sia della pianificazione territoriale che di una migliore gestione delle emergenze. Il principale vantaggio di SMETD consiste nel fatto che le informazioni richieste sono in genere disponibili o facilmente reperibili; inoltre, la sua semplicità ne consente un utilizzo non limitato agli esperti del settore.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni c'è stato un grande interesse scientifico e applicativo nello sviluppo, nell'implementazione e nella verifica di metodi speditivi rivolti alla determinazione di alcuni parametri macroscopici di interesse per l'analisi del rischio: il campo di applicazione primario consiste nella determinazione delle distanze di danno a seguito di rilasci pericolosi. Questi metodi presentano come principale vantaggio quello di permettere l'ottenimento di risultati in maniera piuttosto veloce a partire da pochi dati di base essenziali.

Uno dei campi di applicazione dei metodi speditivi è senza dubbio la determinazione delle distanze di danno che corrispondono a determinate classi di effetto e, in particolare, per la dispersione delle sostanze tossiche, la determinazione delle aree di impatto e la percentuale di danno attesa al variare della distanza dalla sorgente. Il rilascio di sostanze tossiche nell'ambiente si presenta, infatti, come uno dei peggiori e più temuti scenari incidentali nell'industria di processo [1]. Anche se gli incendi e le esplosioni si presentano assai più frequentemente [2,3] e causano, nel loro insieme, un maggiore numero di morti ogni anno rispetto alla dispersione di tossici, un solo evento di quest'ultimo tipo, seppure più raro, è in grado di coinvolgere in maniera più severa la popolazione e l'ambiente, come è accaduto, per esempio, negli incidenti di Bhopal e di Seveso.

L'interrogazione dei database MHIDAS [4] e MARS [5] evidenzia che gli scenari che implicano il rilascio di sostanze potenzialmente tossiche si attesta intorno al 25% del totale degli scenari incidentali registrati. La percentuale degli scenari che hanno presentato la formazione di una nube tossica scende, secondo MHIDAS [4], a circa il 10% mentre secondo MARS [5], si attesta intorno al 18%.

Il presente lavoro, basato su un gran numero di simulazioni di rilasci di sostanze tossiche, propone un nuovo metodo speditivo (SMETD) che consente di ottenere immediatamente le equazioni che forniscono il profilo di concentrazione e la percentuale di danno attesa in funzione della distanza per diverse tipologie di rilascio di sostanze tossiche. L'applicazione principale di SMETD è volta alla determinazione dell'ampiezza delle zone di pianificazione dell'emergenza e la sua efficacia è confrontata con quella del metodo speditivo italiano [6] e di quello del TNO [7], suggerendo opportune modifiche a queste ultime metodologie di calcolo che consentono di rendere più realistiche e conservative le stime delle aree di danno.

2. ZONE DI PIANIFICAZIONE DELL'EMERGENZA

La gestione di un'emergenza derivante dal rilascio di sostanze tossiche richiede di descrivere completamente il territorio intorno all'impianto in termini classi di impatto e di zone di intervento. A questo proposito le metodologie speditive si rivelano particolarmente utili perché permettono una prima definizione delle risorse necessarie e consentono di procedere con l'analisi della vulnerabilità del territorio e dell'ambiente.

La suddivisione effettuata prevede tre zone: la zona 1, di sicuro impatto; la zona 2, di danno e la zona 3,

di attenzione. Le caratteristiche ed i metodi di valutazione dell'estensione di queste zone sono descritte nei paragrafi successivi.

2.1 Zona 1: zona di sicuro impatto

Essa è caratterizzata da effetti sanitari che comportano una elevata probabilità di letalità anche per le persone mediamente sane, specialmente nel caso in cui non siano disponibili rifugi sicuri, o in cui la durata del rilascio o le caratteristiche della sostanza lo rendano particolarmente critico. Nel caso di dispersione di sostanze tossiche questa prima zona può raggiungere un raggio anche di centinaia di metri e coinvolgere aree ben al di fuori dei confini dello stabilimento.

Ragionando per linee del tutto teoriche, in questa zona l'intervento di protezione da pianificare consiste, in generale, e in particolare per il rilascio di sostanze tossiche, nel trovare riparo in un rifugio al chiuso. Occorre prestare attenzione all'efficacia delle misure di protezione rispetto al tempo di estrinsecazione del fenomeno pericoloso: quest'ultimo può variare da secondi a minuti ed i danni potenziali sull'uomo, quali l'intossicazione e la morte, possono presentarsi con un tempo di risposta variabile da pochi secondi, a minuti, ore e giorni. Infine non si può escludere la possibilità di effetti domino, dovuti all'indisponibilità degli operatori da cui può scaturire una perdita di controllo dell'impianto.

Il rilascio di sostanze tossiche presenta non pochi problemi e complicazioni: solo in casi particolari (incidente non in atto, ma potenziale e a sviluppo prevedibile, oppure rilascio tossico di durata tale da rendere inefficace il rifugio al chiuso), ove ritenuto opportuno e tecnicamente realizzabile, dovrà essere prevista l'evacuazione spontanea o assistita della popolazione. Tale eventuale estremo provvedimento, che sarebbe del resto facilitato dalla presumibile limitatezza dell'area interessata, deve essere preso in considerazione con estrema cautela e solo in circostanze favorevoli. In effetti una evacuazione con un rilascio in atto porterebbe, salvo casi eccezionali e per un numero esiguo di individui, a conseguenze che potrebbero rivelarsi ben peggiori di quelle che si verrebbero a determinare a seguito di rifugio al chiuso.

Deve essere previsto un sistema di allarme che avverta sia il personale di impianto che la popolazione del pericolo. È necessaria, inoltre, un'azione di informazione preventiva particolarmente attiva e capillare e delle prove di emergenza svolte con regolarità.

I metodi speditivi consentono di determinare il raggio della zona di "sicuro impatto".

2.2 Zona 2: zona di danno

La seconda zona è caratterizzata da possibili danni, anche irreversibili, per persone mediamente sane che non intraprendano le corrette misure di protezione e da danni anche letali per persone particolarmente vulnerabili. Il comportamento migliore in caso di rilascio tossico è generalmente quello di rimanere in un luogo chiuso sicuro. Eventuali zone dove è possibile una elevata concentrazione di persone vulnerabili dovrebbero essere prese in particolare considerazione per provvedimenti specifici (rifugi immediatamente raggiungibili, segnaletica luminosa adeguata, eccetera).

Sono indispensabili per tutta la popolazione coinvolta: formazione e addestramento, prove di evacuazione, attrezzature di protezione individuale, sistema di allarme adeguato. Per quanto riguarda i danni sull'ambiente è possibile una contaminazione degli acquiferi e del suolo, morte di animali anche di grossa taglia, ecc.

In generale gli effetti possono essere sia acuti che cronici. Particolarmente vulnerabili sono gli acquiferi. Nel caso di impianti in cui c'è presenza di sostanze particolarmente tossiche per l'uomo e per l'ambiente si rende necessario uno studio sistematico di vulnerabilità dell'area di studio.

L'estensione della zona 2 è ricavabile mediante i metodi speditivi moltiplicando per un opportuno indice l'estensione della zona 1.

2.3 Zona 3: zona di attenzione

La terza zona è caratterizzata dal possibile verificarsi di danni, generalmente reversibili, per soggetti particolarmente vulnerabili. L'estensione della zona 3 è direttamente legata alla dimensione dell'area di studio, quindi la sua determinazione risulta particolarmente critica proprio in sede di pianificazione dell'analisi di rischio. Per rilasci tossici il comportamento consigliabile rimane il rifugio al chiuso. Devono essere previsti interventi mirati per siti particolarmente vulnerabili come scuole, ospedali, luoghi di affollamento e azioni di controllo del traffico specie quello diretto verso le zone 1 e 2.

Nel caso del rilascio di sostanze tossiche facilmente rilevabili per odore o per caratteristiche irritanti, è necessario valutare con attenzione le conseguenze che reazioni di panico potrebbero provocare in luoghi particolarmente affollati. Anche in questa zona deve essere previsto un sistema di allertamento adeguato.

I metodi speditivi non prevedono, in genere, il calcolo dell'estensione della zona di attenzione.

3. METODO RAPIDO SMETD PER RILASCI DI SOSTANZE TOSSICHE

La valutazione sistematica dell'impatto tossico [8] richiede normalmente un'analisi di rischio di base e la conoscenza di molti parametri di tipo impiantistico, modellistico, e tossicologici [9,10]. Inoltre è richiesta una certa esperienza con i software di simulazione che implementano i complessi modelli di dispersione che, di volta in volta, dipendentemente dalla tipologia della sostanza considerata e dalla natura delle condizioni al contorno, devono essere utilizzati per ottenere, alla fine, i diversi profili di concentrazione della sostanza tossica al variare della distanza dalla sorgente di emissione e il *footprint* del rilascio stesso. Altri parametri di interesse, oltre la massima distanza raggiunta, sono la velocità con cui la nube tossica si muove, la forma della nube e la sua semiapertura massima.

A un primo stadio della stesura del piano di emergenza esterna o in tutti quei casi sia necessaria una verifica che non sia "time consuming" sia per l'implementazione che per la ricerca dei dati di partenza, è opportuno avere a disposizione un metodo sufficientemente affidabile che richieda in input solo un set di dati minimo.

Da queste esigenze è nata l'idea di sviluppare SMETD, *Speed Method for Evaluation of Toxic Dispersions*, un metodo semi-indicizzato che permette di valutare ogni tipo di rilascio tossico.

Tale metodo può essere usato per determinare facilmente:

- le distanze di danno di riferimento per tutte le sostanze tossiche;
- le percentuali di danno, espresse in percentuale di decessi attesi;
- la distanza a cui corrispondono valori di soglia di riferimento;
- i profili delle dispersioni.

3.1 Approccio metodologico

L'approccio metodologico utilizzato si ispira a quello del primo, e forse più efficace, tra i metodi speditivi proposti, quello del TNO [7]. L'obiettivo è quello di sviluppare un metodo rapido più perfezionato che permetta di ottenere anche dei profili di concentrazione e una stima del danno in funzione della distanza, e che, a differenza di come accade talvolta con il metodo del TNO, fornisca stime conservative.

La procedura proposta prevede l'introduzione di due indici che tengono conto delle:

- caratteristiche di tossicità della sostanza valutate tramite l'IDLH [11]. Questo è il parametro attualmente più diffuso e affidabile, a cui possono essere ricondotti anche altri fattori, quali l'ERPG-2 e, nella maggior parte dei casi, l'LC₅₀. Va infine sottolineato come tale parametro, qualora non fosse disponibile per la sostanza di interesse sia anche ricavabile, per classi di sostanze, mediante opportune metodologie di conversione [12].
- tipologie dello stoccaggio o della lavorazione della sostanza.

Lo schema di base del metodo SMETD è riportato in Figura 1.

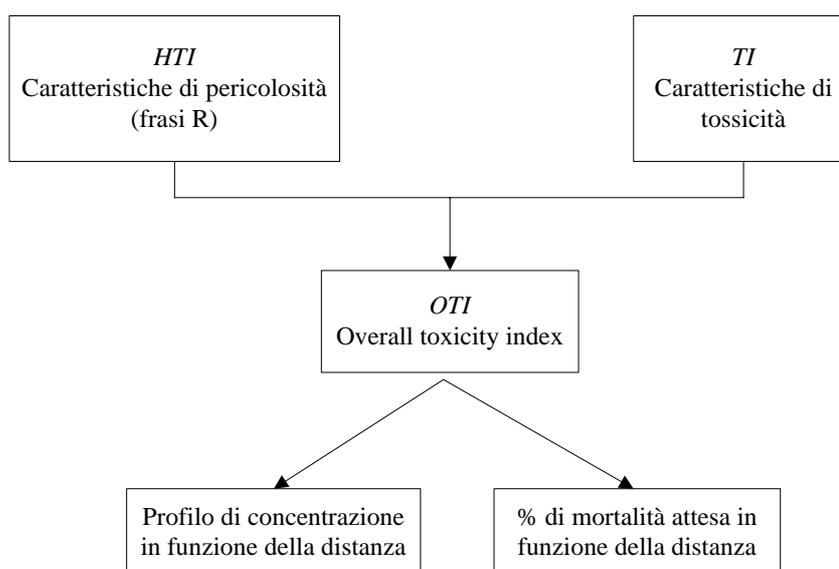


Figura 1. Schema di base della metodologia SMETD

Il metodo è stato costruito a partire dalla definizione dell'*Overall Toxicity index*, l'indice di tossicità complessivo, derivante dal contributo di due termini, *HTI* e *TI*:

$$OTI = \sqrt{HTI \cdot TI} \quad (1)$$

3.1.1 Hazard Toxicity Index

HTI, l'*Hazard Toxicity Index*, o fattore di tossicità, risulta composto da due contributi, *HTI_{tf}* e *HTI_{vf}*:

$$HTI = HTI_{tf} + HTI_{vf} \quad (2)$$

HTI_{tf}, denominato fattore di tossicità, tiene conto dello specifico pericolo che presenta una determinata sostanza in termini di impatto tossico. I valori di *HTI_{tf}* variano tra 0.5 ed 8 e si ricavano dalla sola conoscenza dell'IDLH e delle condizioni di stoccaggio per mezzo della Tabella 1.

Tabella 1. Fattore di tossicità

IDLH (ppm)	Fattore di tossicità (<i>HTI_{tf}</i>)
> 35000	0.5
3500 – 35,000	1
350 – 3500	2
100 – 350	3
30 – 100	4
3.5 – 30	5
1 – 2	6
0.5 – 1	7
< 0.5	8

HTI_{vf}, denominato fattore di volatilità, tiene conto, attraverso la determinazione di un fattore di volatilità, dello stato fisico della sostanza e delle condizioni di stoccaggio. I valori di *HTI_{vf}* variano tra 1 a 4.5 secondo le categorie illustrate nella Tabella 2.

Tabella 2. Fattore di volatilità

Stato fisico della sostanza (Stoccaggio/condizioni operative)	Fattore di volatilità (<i>HTI_{vf}</i>)	
Liquidi tossici	Tensione di vapore (atm)	
	< 0.05	1
	0.05 – 0.15	2
	0.15 – 0.3	3
	0.3 – 1.5	4
	> 1.5	4.5
Gas tossici liquefatti per mezzo di pressione	Temperatura di ebollizione (°C)	
	> -2	2
	da -8 a -2	3
	da -30 a -8	3.5
	< -30	4
Gas tossici liquefatti per mezzo di refrigerazione	Temperatura di ebollizione (°C)	
	> -20	3
	da -30 a -20	3.5
	< -30	4
Gas tossici in pressione	pressione (atm)	
	3 – 10	2
	10 – 20	2.5
	20 – 40	3
	> 30	4

3.1.2 Toxicity Index

Il *Toxicity Index*, l'indice di tossicità, tiene conto della tipologia di pericolo presentata dalla sostanza ed è calcolato a partire dalle frasi di rischio della sostanza considerata. Tramite giudizio esperto di un nutrito team di ricercatori ed esperti della materia, tenendo pure conto delle linee guida sulla sicurezza dei trasporti di merci pericolose e di varie classificazioni di sostanze pericolose, si è costruito un sistema di pesi da attribuire alle singole frasi di rischio. In particolare si sono valutati due parametri che corrispondono alle due *routes of entry* principali quando si è esposti a un rilascio di sostanze tossiche: il contatto e l'inalazione.

Sono stati definiti per tale scopo due nuovi indici: l' HT_{in} e l' HT_{sc} . Questi indici assumono valori (vedi Tabella 3), che variano da 4.5, per sostanze che danno irritazioni, fino a 8.5, per sostanze che possono dare luogo a neoplasie.

Tabella 3. Indice di pericolo per inalazione e contatto con pelle.

Numero	Frase di rischio	HT_{in}	HT_{sc}
R20	Nocivo per inalazione	5,0	-
R21	Nocivo a contatto con la pelle	-	5.0
R23	Tossico per inalazione	7.0	-
R24	Tossico a contatto con la pelle	-	6.5
R26	Molto tossico per inalazione	7.5	-
R27	Molto tossico a contatto con la pelle	-	7.0
R29	A contatto con l'acqua libera gas tossici	5.0	-
R31	A contatto con acidi libera gas tossici	4.0	-
R32	A contatto con acidi libera gas molto tossici	5.0	-
R34	Provoca ustioni	-	6.0
R35	Provoca gravi ustioni	-	7.0
R36	Irritante per gli occhi	-	4.5
R37	Irritante per il sistema respiratorio	4.5	-
R38	Irritante per la pelle	-	4.5
R39	Pericolo di effetti irreversibili molto gravi	7.5	7.5
R40	Possibilità di effetti cancerogeni: prove insufficienti	7.0	7.0
R41	Rischio di serie lesioni oculari	-	6.5
R42	Può provocare sensibilizzazione per inalazione	5.0	-
R43	Può provocare sensibilizzazione a contatto con la pelle	-	5.0
R45	Può provocare il cancro	8.5	8.5
R46	Può provocare alterazioni genetiche ereditarie	7.5	7.5
R47	Può provocare malformazioni congenite	7.5	7.5
R48	Pericolo di gravi danni alla salute in caso di esposizione prolungata	6.5	6.5
R49	Può provocare il cancro per inalazione	8.5	-
R60	Può ridurre la fertilità	6.5	6.5
R61	Può danneggiare i bambini non ancora nati	6.5	6.5
R62	Possibile rischio di ridotta fertilità	5.0	5.0
R63	Possibile rischio di danni ai bambini non ancora nati	6.0	6.0
R65	Nocivo: può causare danni ai polmoni in caso di ingestione	-	-
R66	L'esposizione ripetuta può provocare secchezza e screpolature della pelle	-	4.0
R67	L'inalazione dei vapori può provocare sonnolenza	4.0	-
R68	Possibilità effetti irreversibili	5.0	5.0

Una volta desunte dalla scheda di sicurezza tutte le frasi di rischio della sostanza in esame, si individuano dalla Tabella 3 tutti i contributi che derivano dal contatto con la pelle e quelli che derivano dall'inalazione. Nel caso in cui per una delle voci siano presenti più frasi di rischio, vanno prese tutte in considerazione per

essere combinate come prevede l'equazione (3), in cui il calcolo viene fatto secondo la logica della media logaritmica:

$$TI = \log \left(10^{\left(\log \left(\sum_{i=1}^n 10^{HT_m^{(i)}} \right) \right)} + 10^{\left(\log \left(\sum_{j=1}^m HT_{sc}^{(j)} \right) \right)} \right) \quad (3)$$

Le motivazioni di questa scelta, a cui si è pervenuti dopo un'attenta analisi di più di 400 schede di sicurezza di sostanze diverse, sono date dal fatto che questo tipo di operazione matematica tende a "conservare" il termine con il valore più alto. Non era infatti consigliabile utilizzare la semplice media aritmetica o quella geometrica, come mostra il fatto che nel caso di sostanze cancerogene (R45) che abbiano anche altre caratteristiche di pericolosità come con più bassi valori dei fattori *HT* ne risulterebbe una diminuzione ingiustificata della media. Utilizzando la media proposta, invece, i termini di valore più basso danno un contributo minimo al valore di base.

L'approccio proposto è facilmente estendibile alle frasi di rischio riferite all'ambiente (simbolo generale di pericolo *N*), che però non sono ancora molto diffuse, sebbene la UE stia stimolando degli studi e l'introduzione di nuove frasi di rischio specifiche.

3.1.3 Overall Toxicity Index

L'applicazione della procedura di calcolo sopra descritta ha portato, per alcune delle sostanze tossiche più diffuse, ai seguenti risultati:

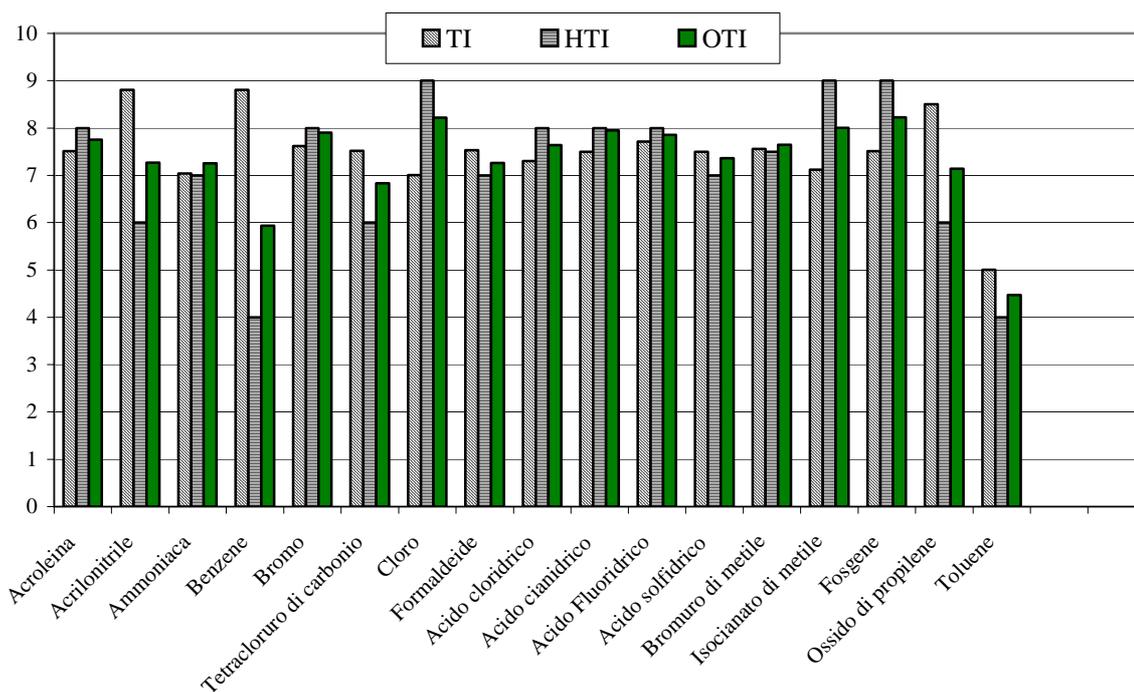


Figura 2. Overall Toxicity Index, TI, HTI per alcune sostanze tossiche

Esaminando la Figura 2 si nota come i valori di *OTI* ottenuti siano variati tra 4 a 9 dipendentemente dalle caratteristiche globali di tossicità della sostanza e della sua potenzialità di impatto derivanti dalla dispersione.

3.2 Simulazione della dispersione delle sostanze tossiche

I metodi speditivi seguono una logica denominata *worst case scenario approach* [13]; essi dovrebbero quindi essere in grado di valutare le conseguenze del peggiore caso possibile [14,15]. Ad esempio, per quanto riguarda gli stoccaggi di sostanze pericolose, lo scenario peggiore possibile corrisponde, nella

maggior parte dei casi, alla rottura catastrofica del recipiente, eventualmente durante un'operazione di caricamento, con conseguente dispersione istantanea sotto forma di nube di tutto il fluido contenuto in esso, nelle linee e nell'eventuale mezzo che provvede al caricamento.

Nel presente lavoro, per analizzare l'efficacia dei principali metodi speditivi sono state effettuate varie centinaia di simulazioni del rilascio di varie classi di sostanze tossiche, per un totale di una trentina di prodotti, utilizzando i software di analisi delle conseguenze Trace 8.4 [16] e ALOHA [17].

Le principali ipotesi di base considerate nelle simulazioni sono state:

- Condizioni di rilascio istantaneo;
- Quantità di sostanza di riferimento: 30 t, 50 t, 100 t;
- Superficie della pozza pari a 100 m²;
- Rugosità superficiali: 0,03 e 0.1;

Sono state inoltre considerate le condizioni meteorologiche espresse mediante le seguenti combinazioni di classi di stabilità secondo Pasquill e velocità del vento (espresse in m/s):

- A2, A3, D3, D4, D5, F1, F2.

Complessivamente, per ogni prodotto, si sono effettuate circa una ventina di simulazioni di rilasci tossici, ottenendo i profili di concentrazione nel tempo e nello spazio. La conoscenza di questi profili consente anche, per il tramite delle funzioni di probit, di determinare le probabilità di letalità.

Questo complesso di dati ha costituito la base di informazioni con cui sono state confrontati i risultati derivanti dall'applicazione dei metodi speditivi analizzati e di quello proposto.

3.2.1 Correlazione dei profili di concentrazione e di letalità in funzione della distanza

I profili di concentrazione sono stati correlati in funzione del valore dell'*OTI*, determinati come descritto nel paragrafo precedente, utilizzando espressioni a potenza, i cui parametri sono riportati in Tabella 4:

$$c = k_1 x^{k_2} \quad (4)$$

Procedendo in modo analogo si è proceduto a ricavare i profili di letalità attesa in funzione della distanza:

$$D = \min[100; k_3 \exp(k_4 x)] \quad (5)$$

Tabella 6. Valori delle costanti per la determinazione dei profili di concentrazione e di letalità attesa

Stato fisico	<i>OTI</i>	k_1	k_2	k_3	k_4
Liquidi tossici	< 6.5	$3.95 \cdot 10^6$	-1.5019	$3.00 \cdot 10^8$	-0.4511
	da 6.5 a 7.3	$1.77 \cdot 10^5$	-1.2371	$1.01 \cdot 10^3$	-0.0067
	Da 7.3 a 8	$1.00 \cdot 10^7$	-1.739	$1.54 \cdot 10^5$	-0.0064
	> 8	$2.00 \cdot 10^7$	-2.014	$1.63 \cdot 10^2$	-0.0013
Gas tossici liquefatti per mezzo di pressione	< 7.5	$1.00 \cdot 10^8$	-1.5409	$2.50 \cdot 10^2$	-0.0034
	da 7.5 a 8.1	$1.00 \cdot 10^{10}$	-2.2607	$1.16 \cdot 10^3$	0.0017
	> 8.1	$9.00 \cdot 10^6$	-1.3437	$3.91 \cdot 10^2$	-0.0027

I risultati così ottenuti sono stati confrontati con quelli derivati dalle simulazioni con i software di analisi delle conseguenze. La Figura 3 mostra un confronto tra i profili di concentrazione ottenuti mediante le simulazioni nel caso di dispersione di 60 t di ammoniaca in condizioni meteo F2 e di 50 t di acido solfidrico in condizioni D5, rapportati con quello calcolato mediante l'equazione (4) del metodo SMETD. Queste sostanze, infatti, presentano un valore di *OTI* che ricade nella stesso intervallo e condizioni di stoccaggio simili (gas liquefatti a pressione). Dall'esame della Figura 3 si nota come il metodo SMETD consenta di valutare efficacemente, e in modo conservativo, i profili di concentrazione per entrambe le sostanze considerate.

La Figura 4 mostra un altro confronto tra profili di concentrazione ottenuti dalla simulazione e mediante il metodo SMETD, relativo alla categoria dei liquidi tossici. Anche in questo caso, relativo alla dispersione di 45 t di acido cianidrico (*OTI* = 7.64) in condizioni F2, i risultati ottenuti sono soddisfacenti.

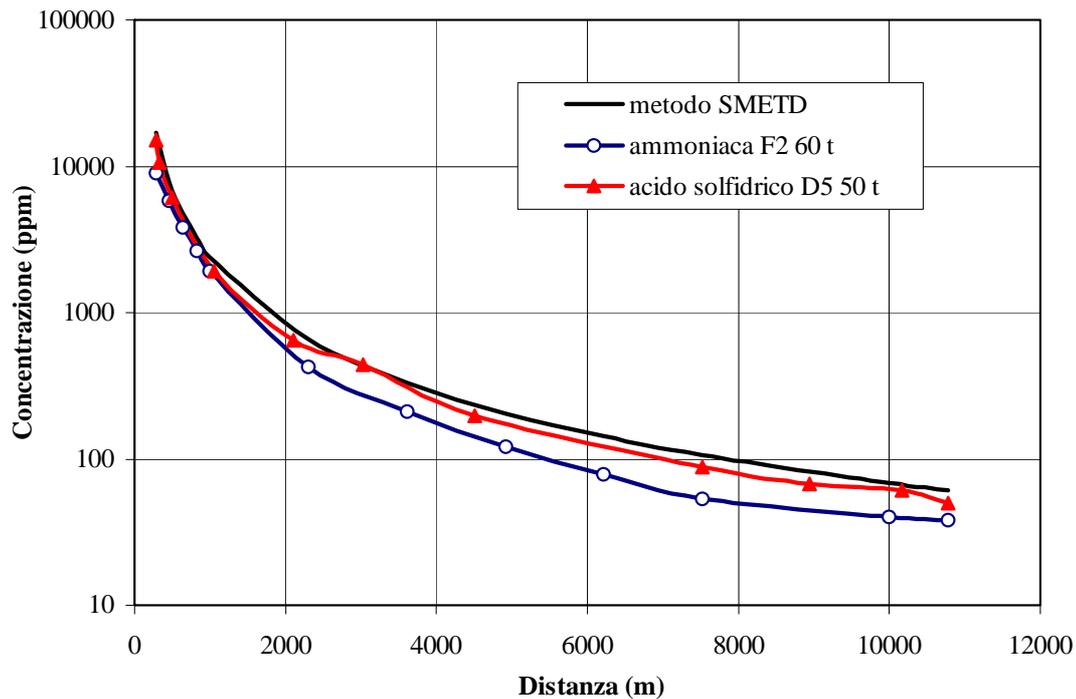


Figura 4. Concentrazione in funzione della distanza per alcuni gas liquefatti tossici.

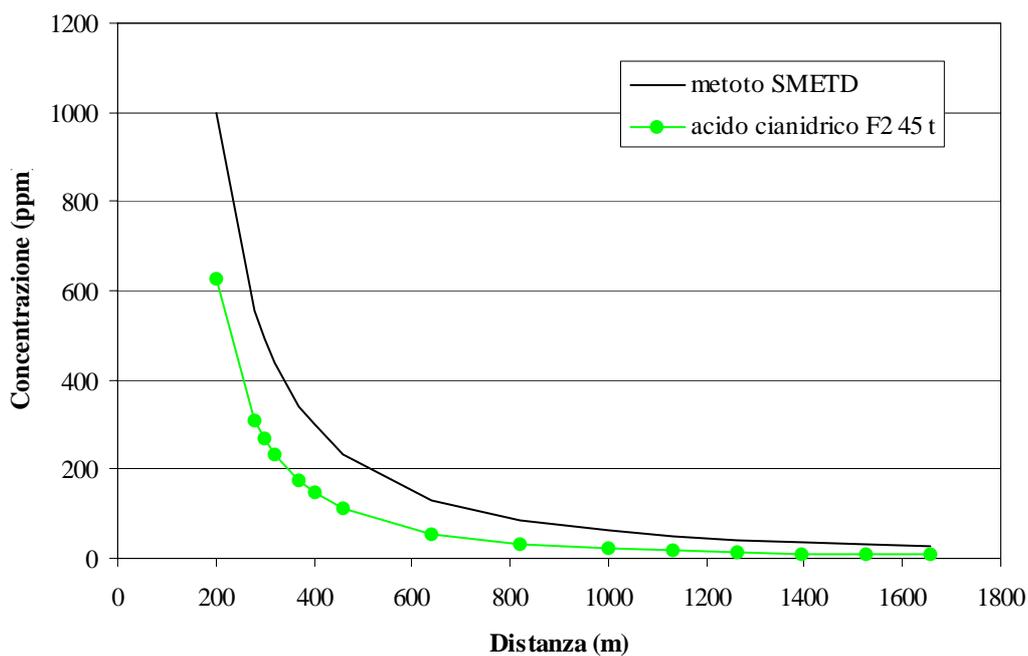


Figura 5. Concentrazione in funzione della distanza per un liquido tossico..

I risultati ottenuti mostrano l'efficacia del metodo SMETD nella predizione, in modo conservativo, dei profili di concentrazione. Nel caso non sia possibile o conveniente utilizzare software di simulazione, lo SMETD può quindi essere facilmente utilizzato dalle autorità competenti, in fase di pianificazione del piano di emergenza esterno e in fase di controllo preliminare dei rapporti di sicurezza presentati. Questi ultimi, infatti, dovrebbero fornire, tra le altre informazioni e risultati delle simulazioni degli eventi incidentali, i dati base per il controllo attraverso metodi speditivi.

4 DETERMINAZIONE DELLE ZONE DI PIANIFICAZIONE DELL'EMERGENZA

4.1 Zona 1: di sicuro impatto

Il metodo SMETD, come pure gli altri metodi speditivi, consente di ottenere il raggio della zona di "sicuro impatto" che delimita la Zona 1 definita in precedenza.

La Tabella 4 mostra, per alcune sostanze tossiche, il confronto tra i risultati ottenuti con il metodo SMETD, con il modello speditivo del 1994 [6] e dalla simulazione effettuata con i software di analisi delle conseguenze: per questi ultimi si sono riportati in Tabella 4 i valori più conservativi tra quelli ottenuti, nelle stesse condizioni, con i software TRACE e ALOHA.

Tabella 4. Raggio (m) della zona di "sicuro impatto"

Sostanza	Simulazione mediante software	Metodo SMETD	Metodo speditivo 1994	Metodo speditivo modificato
Acido acetico	212	226	100	790
Acroleina	1136	1579	500	1500
Acrolonitrile	425	478	100	750
Ammoniaca	1126	1327	100	1200
Cloro	1787	1818	500	2000
Isocianato di metile	1446	1910	500	1750
Bromo	335	293	25	350
Acido cianidrico	361	478	50	750
Acido cloridrico	695	670	100	600
Acido fluoridrico	857	683	100	600

Dall'esame della Tabella 4 si nota come i valori previsti con il metodo SMETD risultino, in tutti casi studiati eccetto uno, ragionevolmente conservativi rispetto a quelli ottenuti dalla simulazione con software di analisi delle conseguenze. Al contrario, il metodo speditivo del 1994 ha portato, in generale, a sottostimare i raggi della zona 1, di un fattore che, per alcuni dei prodotti considerati, supera l'ordine di grandezza. Le ragioni di questi scostamenti e le possibili modifiche da apportare alle tabelle di tale metodo sono illustrate nel paragrafo seguente.

4.1.1 Metodo speditivo italiano del 1994

In Italia, a valle del recepimento della prima direttiva Seveso, tramite il DPR 175/88, fu elaborato con il coordinamento dalla Protezione Civile un metodo speditivo [6] per il calcolo delle distanze di danno. L'esigenza di avere un metodo semplice e veloce nasceva per far fronte alla lentezza dei procedimenti istruttori e la conseguente validazione degli scenari incidentali riportati dai gestori degli impianti nei rapporti di sicurezza. La procedura adottata traeva spunto dal metodo del TNO [7], che, a sua volta, si ispirava a criteri americani.

Il metodo speditivo italiano del 1994, tuttora ampiamente utilizzato, ha il pregio di permettere di determinare velocemente le zone di pianificazione sulla base di elementi facilmente reperibili e indipendentemente dagli scenari individuati dal gestore. La semplicità del metodo speditivo italiano costituisce il suo punto di forza ma, al tempo stesso, il principale punto di debolezza, poiché non consente di caratterizzare efficacemente la dispersione della sostanza tossica.

Nel dettaglio, l'applicazione del metodo speditivo italiano prevede i seguenti passi:

1. Determinazione della sostanza chiave e della quantità coinvolta nello scenario;
2. Determinazione della tipologia di stoccaggio o dell'unità di processo sede del rilascio;
3. Ubicazione approssimativa del rilascio;
4. Determinazione delle distanze di impatto.

In particolare, la determinazione della distanza di danno viene fatta attraverso l'applicazione in cascata di quattro tabelle allegate al metodo stesso:

- la prima tabella permette di individuare tramite la sostanza un codice di riferimento;
- con la seconda tabella si determina la classificazione per modalità di detenzione o per tipologia di attività;
- con la terza tabella si determinano le categorie degli effetti;
- con la quarta tabella si determina il raggio della "zona di sicuro impatto".

Una delle ragioni della sottostima dell'ampiezza della zona 1, rilevata nel paragrafo precedente, è insita

nel fatto che la terza e la quarta tabella utilizzate dal metodo speditivo sono state costruite ipotizzando condizioni meteorologiche D5, ove questa assunzione di base non permette di restituire risultati conservativi in condizioni meteorologiche diverse.

Alla luce dei risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate nel presente lavoro si sono proposte delle modifiche alla terza ed alla quarta tabella del metodo speditivo, ossia a quelle che determinano le categorie degli effetti ed i raggi della “zona di sicuro impatto”, prevedendo un numero maggiore di categorie rispetto a quanto riportato nel metodo speditivo. La Tabella 5 riporta le modifiche proposte per quanto riguarda la quarta tabella del metodo speditivo, mentre i dettagli di quanto proposto riguardo alla terza tabella, che è molto articolata, sono riportati altrove [12].

Tabella 4. Raggio della zona di “sicuro impatto”.

Categoria	Raggio dell'area relativa alla zona di “sicuro impatto” per sostanze tossiche (m)	
	Tabella 4 modificata	Tabella 4 metodo speditivo 1994
A	0 - 125	0 - 25
B	125 - 230	25 - 50
B+	125 - 350	
C	230 - 600	50 - 100
C+	230 - 750	
D	600 - 790	100 - 200
D+	600 - 1200	
E	790 - 1500	200 - 500
E+	790 - 1750	
F	500 - 1000	500 - 1000
F+	500 - 2000	
G	1000 - 3000	1000 - 3000
H	3000 - 10000	3000 - 10000

Apportando alla terza e quarta tabella del metodo speditivo le modifiche proposte, l'accordo tra i risultati che si ottengono applicando il metodo e quelli delle simulazioni migliora sensibilmente, come mostra l'ultima colonna della Tabella 4.

4.2 Zona 2: di danno

I metodi speditivi valutano il raggio della zona 2, di danno, tramite un indice che va a moltiplicare il raggio della zona 1, di sicuro impatto:

$$R_{zona2} = R_{zona1} \cdot i \quad (6)$$

dove R_{zona2} ed R_{zona1} sono, rispettivamente i raggi delle zone 2 ed 1, ed i è un indice.

In particolare, secondo il metodo del TNO [7], valori di i per sostanze tossiche sono dati dalla:

$$i = 0.35 + 0.65 \sqrt{\frac{LC_{50}(30\text{min})}{IDLH}} \quad (7)$$

Sulla base delle numerose simulazioni di dispersioni di sostanze tossiche effettuate nel presente lavoro i valori dell'indice i proposti nel metodo del TNO appaiono troppo bassi e quindi, in alcuni casi, possono rivelarsi inadatti per progettare efficacemente la pianificazione dell'emergenza. Si rammenta a riguardo che il controllo della zona 2 risulta fondamentale per la gestione dell'emergenza e che errori di sottovalutazione dell'ampiezza di questa zona possono portare a gravi conseguenze in termini di perdita di vite umane ed efficacia dell'intervento.

Le simulazioni effettuate hanno portato a concludere che, per la maggior parte delle sostanze, l'area di riferimento per la zona 2 deve essere quella che corrisponde pressappoco a una concentrazione pari a 1.0 - 1.35 IDLH. Tuttavia, adottando questo criterio, per sostanze che presentano un valore di IDLH molto basso, l'area di controllo per la zona 2 risulterebbe estremamente estesa. Quindi, sebbene gli effetti rimangano tali da creare una situazione di pericolo per la popolazione, l'ampiezza della zona 2 va stabilita dipendentemente dalla situazione effettiva del territorio e dalle condizioni meteorologiche. In particolare, per sostanze con IDLH < 90 deve essere condotta un'accurata indagine sul regime dei venti per poterne stabilire direzioni

prevalenti e velocità di riferimento.

Per quanto riguarda l'estensione della zona 2 rispetto a quella della zona 1, la Tabella 5 riporta il confronto tra i valori risultanti dall'equazione (6), validi per il metodo speditivo del 1994, e quelli ottenuti basandosi sulle considerazioni appena esposte.

Tabella 5. Valori dell'indice moltiplicativo *i* per l'ampiezza della zona 2.

Sostanza tossica	Valore dell'indice <i>i</i>	
	Metodo speditivo 1994	Valore proposto
Acido cianidrico	1.4	6.7
Acido cloridrico	3.7	6.0
Acido fluoridrico	4.8	5.3
Acrilonitrile	1.4	2.7
Acroleina	3.7	4.2
Ammoniaca	3.1	4
Bromo	3	8.5
Cloro	2.6	5.1

Anche in questo caso appare evidente come il metodo speditivo del 1994 sia inadeguato per la previsione degli scenari incidentali, non solo della zona 1, ma anche della zona 2.

Zona 3: di attenzione

Per quanto riguarda l'estensione della zona 3, occorre preliminarmente rimarcare come per essa non sia facile stabilire in maniera univoca un raggio di riferimento.

Sulla base delle simulazioni effettuate nel presente lavoro, in questo caso una prima stima su cui basare la determinazione dell'area di studio per varie tipologie di impianto, può essere basata sulla relazione seguente:

$$R_{\text{zona3}} = \max \left[d \left(\frac{\text{IDLH}}{4} \right), \text{ERPG2} \right] \quad (8)$$

Per le sostanze citate precedentemente si ottengono i seguenti valori:

Tabella 6. Estensione della zona 3 per alcune sostanze.

sostanza	IDLH (ppm)	ERPG-2 (ppm)	Distanza per IDLH/4 o ERPG-2 (m)
Acido cianidrico	50	50	10463
Acido cloridrico	50	20	27810
Acido fluoridrico	30	20	2890
Acrilonitrile	85	35	1480
Acroleina	2	0,5	7981.6
Ammoniaca	300	150	7891.8
Bromo	3	0,4	13916.8
Cloro	10	3	17825.8
Fosgene	2	0,2	20558.4
Isocianato di metile	3	0,5	21992

Va rimarcato come tali valori costituiscano una prima indicazione che va quindi esaminata con attenzione, discussa, valutata e, eventualmente, modificata in sede di stesura del piano operativo di emergenza esterna.

5 CONCLUSIONI

La metodologia SMETD proposta consente da un lato di stimare in maniera conservativa gli impatti dovuti al rilascio di sostanze tossiche, dall'altro di determinare, seppur in maniera grezza, i profili di concentrazione e di danneggiamento in funzione della distanza e quindi di poter definire l'ampiezza dell'area

di studio. Sono stati altresì proposti dei criteri per la suddivisione di tale area in tre zone di emergenza in funzione della severità degli effetti attesi. Le procedure di calcolo sono piuttosto semplici e di veloce applicazione, e possono essere facilmente utilizzate da personale che non ha particolare dimestichezza con gli strumenti avanzati tipici dell'analisi del rischio. In quasi tutti i casi studiati il metodo speditivo modificato e il metodo SMETD si sono dimostrati in buon accordo con i dati ottenuti dalle simulazioni con software di analisi delle conseguenze, con sovrastime sufficientemente contenute, e solo in pochissimi casi il valori sono stati sottostimati. Si sono pure proposti affinamenti del metodo speditivo italiano del 1994 che consentono, mantenendone inalterato l'impianto di calcolo, di ottenere risultati più affidabili.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Hasstrup, L. Brockhoff, *Severity of accidents with hazardous material*, Journal of Loss Prevention for Process Industries, 3395-3402 (1990);
- [2] I. Khan Faisal, S.A. Abbasi, *Major accidents in process industries and analysis of causes and consequences*, Journal of Loss Prevention for Process Industries, vol. 12, pp. 361-378 (1999);
- [3] S. Carol, J.A. Vilchez, J. Casal, *Study of the severity of industrial accidents with hazardous substances by historical analysis*, Journal of Loss Prevention for Process Industries, vol. 15, pp. 517-524 (2002);
- [4] MHIDAS, Mayor Hazard Incident Data Service, OHS-ROM, Reference Manual (2001);
- [5] C. Kirchsteiger, EC DG-JRC, MAHB, *Technical guideline on reporting accident to the MARS database*, <http://mahbsrv.jrc.it/mars/MARS-Technical-Guideline-February-2001.pdf> (2001);
- [6] Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, *Pianificazione di emergenza esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante*, linea guida (1994);
- [7] TNO, *Methods for the determination of possible damage to humans and goods by the release of hazardous material*, In: Green Book, Dutch Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, The Hague (1990);
- [8] P.K. Ray, *Heavy gas dispersion – A state-of-art review of the experimental results and models*, Heavy gas dispersal lecture series, Von Karman Institute, Brussels, Belgium (1982);
- [9] G.P. Carlson, *Toxic Substances and Human Risk – Principles of Data Interpretation*, Plenum Press (1984);
- [10] S. Schubach, *A measure of human sensitivity in acute inhalation toxicity*, Journal of Loss Prevention for Process Industries, vol. 10, 309-315 (1997);
- [11] La lista aggiornata degli IDLH è disponibile sul sito del NIOSH, <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>;
- [12] L.G. Luccone, *Realizzazione di una metodologia per la valutazione del rischio d'area ai fini della gestione dell'emergenza esterna e della pianificazione territoriale*, tesi di dottorato, dipartimento di ingegneria chimica, università di Roma "La Sapienza" (2003);
- [13] D.A. Carter, I.L. Hirst, *'Worst case' methodology for the initial assessment of societal risk from proposed major accident installations*, Journal of Hazardous Materials, vol. 71, pp. 117-128 (2000);
- [14] M.P. Singh, M. Manju, T.S. Panwar, H.V.K. Chopra, *Atmospheric dispersion of dense materials for estimating vulnerable zones due to accidental release of toxic chemicals*, Risk Analysis, vol. 113, pp. 425-440 (1991);
- [15] I.G. Lines, J.H. Daycock, D.M. Deaves, *Guidelines for the inclusion of low wind speed conditions into risk assessment*, Journal of Hazardous Material, vol. A83, pp.153-179 (2001);
- [16] SAFER Systems, *TRACE 8.4 User's manual* (2000);
- [17] EPA, NOAA, *ALOHA 5.2.3 User's manual* (1999);
- [18] A. Amendola, S. Contini, I. Ziomas, *Uncertainties in chemical risk assessment: Results of a European benchmark exercise*, Journal of Hazardous Materials, vol. 29, pp. 347-363 (1992).