

ANALISI PARAMETRICA NEL RILASCIO DI SOSTANZE TOSSICHE

Bubbico R., Mazzarotta B.
Dip. Ingegneria Chimica, Università di Roma “La Sapienza”
Via Eudossiana 18, 00184, Roma, Italia

SOMMARIO

Uno dei passaggi fondamentali dell'Analisi di rischio consiste nella valutazione delle aree di impatto associate ai diversi eventi incidentali che si possono verificare durante l'attività analizzata. In particolare, l'estensione delle aree di impatto è funzione di diversi parametri che caratterizzano il cosiddetto “scenario”. Dato che l'analisi di rischio è una procedura probabilistica, tale calcolo, deve essere ripetuto per tutti gli scenari incidentali che si prevede possano verificarsi durante l'attività in esame. Tuttavia, al crescere del numero di eventi da simulare, aumenta anche il tempo richiesto per l'analisi (che comporta anche la valutazione delle frequenze di accadimento dei singoli scenari), e ciò può rappresentare un ostacolo da un lato ad una maggiore diffusione della metodologia, dall'altro all'ottenimento di stime accurate. A ciò si aggiunga che l'influenza della variazione di alcuni dei parametri coinvolti nella definizione di uno scenario potrebbe risultare scarsamente significativa. In base a ciò, risulta evidente come la conoscenza a priori dell'influenza dei vari parametri caratterizzanti lo scenario, sarebbe di grande ausilio nell'ottimizzazione dei tempi di calcolo, in quanto consentirebbe di selezionare e quantificare solo quegli scenari che effettivamente comportano variazioni apprezzabili di tali aree.

A tale scopo, nel presente lavoro si riportano i risultati di uno studio svolto nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dall'ISPESL e dal Ministero della Salute, indirizzato proprio alla valutazione delle aree di danno associate al rilascio accidentale di alcune tra le più comuni e/o pericolose sostanze tossiche utilizzate nell'industria di processo.

1. INTRODUZIONE

L'entità dell'area di impatto associata al rilascio accidentale di una data sostanza, dipende da diversi fattori [1-2], che sono legati alla sostanza stessa, alle modalità con cui avviene il rilascio nella specifica situazione che si vuole analizzare, ed alle condizioni esterne in cui la sostanza si disperde (condizioni meteorologiche, ambientali, legate al territorio, ecc.). Ne consegue che il calcolo richiede la definizione di un elevato numero di parametri di input, il cui valore specifico influenza in maniera più o meno marcata il suo risultato.

Nella valutazione del rischio associato al rilascio di una sostanza tossica, occorrerebbe, quindi, individuare tutti i possibili incidenti di interesse, definire i corrispondenti scenari incidentali, e calcolarne le conseguenze in termini di aree di impatto, in base alle proprietà di pericolosità del materiale, alla quantità di materiale rilasciato e alla sua dispersione nell'ambiente circostante. Dato che l'analisi di rischio è una procedura probabilistica, tale calcolo, per lo meno in linea teorica, deve essere ripetuto per tutti gli scenari incidentali che si prevede possano verificarsi durante l'attività in esame e l'accuratezza del calcolo è tanto maggiore quanto maggiore è il numero di scenari presi in considerazione. Tutto ciò porta a tempi di esecuzione molto lunghi.

Si comprende così come l'esecuzione di uno studio approfondito e dettagliato sia possibile solo in rari casi, mentre, al contrario, lo sforzo di calcolo apparentemente richiesto, di solito ostacola, se non impedisce del tutto, l'analisi, con grave danno dal punto di vista della prevenzione e della definizione delle misure di emergenza da adottare in caso di incidente.

Una possibile semplificazione del problema consiste nell'utilizzare i valori più probabili dei citati parametri di input (ad esempio ricavati da dati storici), e definire così gli scenari più probabili di rilascio e di dispersione. Questo approccio permette di ridurre fortemente il numero di scenari da analizzare, ma ha l'inconveniente di poter essere adottato solo quando si hanno a disposizione dati di probabilità affidabili.

Un metodo alternativo potrebbe essere utilizzato qualora si conoscesse a priori l'effetto dei parametri di input sul risultato del calcolo. In tal caso, infatti, a seconda della situazione particolare (sostanza,

luogo del rilascio, ecc.), noti i parametri che maggiormente influenzano le aree di impatto, sarebbe sufficiente svolgere un numero modesto di simulazioni utilizzando più valori di tali parametri, all'interno dell'intervallo di variabilità previsto per essi. Questo metodo consentirebbe, in sostanza, di ridurre fortemente il carico dei calcoli da svolgere, ma, allo stesso tempo, fornirebbe un risultato sufficientemente accurato e preciso.

A tal fine, nel presente lavoro, sono stati selezionati alcuni dei principali parametri che sono coinvolti nella modellizzazione del rilascio e della dispersione di sostanze tossiche in atmosfera, e per ciascuno di essi è stata esaminata l'influenza sul risultato complessivo. Per avere un riscontro dei risultati o una indicazione sulla dipendenza di questi dalla particolare sostanza in esame, le stesse simulazioni sono state ripetute per 3 sostanze con caratteristiche sufficientemente diverse tra loro, ma sempre relativamente comuni nell'industria chimica di processo.

La individuazione dei parametri che maggiormente influenzano il risultato di un calcolo, ovvero che maggiormente contribuiscono alla sua incertezza, viene comunemente effettuata mediante *studi di sensitività*. Questi consistono proprio nell'esame dell'entità della variazione di una variabile dipendente che si ha a seguito di una variazione della variabile indipendente, e nel confronto tra i valori ottenuti per i diversi parametri. Lo studio viene svolto in diversi modi a seconda del sistema che si analizza, e in molti casi, quando il sistema verifica opportune condizioni, sono a disposizione specifiche tecniche matematiche (per maggiori dettagli su tali tecniche si rimanda alla letteratura specializzata [2-6]). In altri casi, tuttavia, non è possibile applicare tali tecniche, ed occorre ricorrere ai cosiddetti metodi discreti.

Lo studio della dispersione di sostanze tossiche in atmosfera, comprensivo del calcolo della portata rilasciata e della successiva dispersione vera e propria, ricade proprio in questa categoria. Per questo studio, infatti, occorre fare uso di diversi modelli ed equazioni variamente collegati tra loro, nel senso che i risultati di un modello sono i dati di input di un altro e così via. Inoltre, in alcuni casi, la scelta stessa di un modello dipende dal risultato ottenuto con uno precedente. Ciò comporta che per questa analisi, lo studio di sensitività deve fare ricorso ad una procedura molto più "empirica". Un metodo consiste nello svolgimento di tutti i calcoli utilizzando dei valori "nominali" di tutti i parametri tranne che per uno, per il quale, invece, si assumono diversi valori all'interno del suo intervallo di variabilità. Completata l'indagine sul parametro in questione, questo viene fissato al suo valore nominale, e se ne fa variare un altro fino a che tutti i parametri di input siano stati analizzati. Questa procedura va sotto il nome di *analisi parametrica*. Nonostante l'importanza di una simile analisi, pochi resoconti relativi alla dispersione di sostanze tossiche in atmosfera sono riportati nella letteratura specialistica [2,7], ed anche in questi casi, senza un approccio metodologico rigoroso.

Nel presente studio, per ciascuno dei parametri preventivamente selezionati è stato individuato un possibile intervallo di variabilità da dati storici [8], ed all'interno di questo intervallo sono stati scelti alcuni valori specifici da utilizzare per lo svolgimento dei calcoli. In particolare uno di questi valori sarà adottato come valore medio, da mantenere costante quando si analizza l'effetto di un altro parametro.

L'applicazione di questa tecnica è di per sé concettualmente molto semplice, consistendo semplicemente nello svolgimento ripetuto di tutti i calcoli per diversi valori di ciascun parametro. Si intuisce, però, che i limiti e gli inconvenienti di essa consistono nel numero di simulazioni da svolgere, che è tanto maggiore quanto maggiore è il numero di parametri in gioco e quanto più estesi sono gli intervalli di variabilità di ciascuno di essi, e nella limitata generalità delle informazioni fornite che risultano legate alla specifica combinazione parametro-intervallo indagata, mentre non danno informazioni sulla variabilità globale del sistema e sugli effetti combinati della variazione di più parametri contemporaneamente. Resta il fatto che per molti casi essa sia l'unica tecnica applicabile.

2. SOSTANZE STUDIATE

Come sostanze di riferimento per i diversi scenari studiati, sono state adottate l'ammoniaca, l'acido cloridrico e la trimetilammina. Queste sostanze sono state scelte seguendo il criterio di adottare delle sostanze significative sia dal punto di vista della loro diffusione nell'ambito delle attività industriali e/o civili che da quello della loro particolare tossicità.

Tenuto conto sia della reperibilità dei dati in letteratura che di criteri uniformità con analoghe metodologie di analisi, per la loro caratterizzazione tossicologica sono stati adottati i valori di ERPG-2 e di IDLH, riportati nella seguente tabella:

Tabella 1. Le sostanze studiate

Sostanza	ERPG 2 (ppm)	IDLH (ppm)
Ammoniaca	150	300
Acido cloridrico	20	50
Trimetilammina	100	200

3. SCENARI STUDIATI

Per quanto riguarda le condizioni a monte del rilascio, si sono adottate delle condizioni iniziali che potessero il più possibile rappresentare una situazione reale. A tale scopo si è assunto che il rilascio avvenisse attraverso un foro posto nella parte più bassa di un contenitore cilindrico ad asse orizzontale di 3 m di diametro e 10 m di lunghezza, per un volume utile di circa 70 m³, contenente la sostanza allo stato liquido e a temperatura ambiente, mentre la pressione è pari alla tensione di vapore a T_{amb}.

Tutte le scelte illustrate comportano che il rilascio sia sempre in fase liquida ed alla massima portata, che varierà nel tempo in base alla dinamica che si instaura all'interno del serbatoio (velocità di abbassamento del livello di liquido, variazione di temperatura e/o pressione, ecc.). Le dimensioni del foro sono state poste pari a 10, 30 e 50 mm, dove 30 mm è stato assunto come valore standard, e la durata massima della perdita è stata assunta di 15 minuti. In corrispondenza di questo tempo si assume che gli operatori riescano a circoscrivere l'incidente, bloccando sia la perdita vera e propria dal serbatoio che l'evaporazione dalla eventuale pozza di liquido che si forma sul terreno.

I principali parametri che definiscono le condizioni esterne sono le condizioni meteorologiche e la conformazione del terreno. Tra i numerosi parametri meteorologici, sono stati fatti variare quelli che maggiormente influenzano la dispersione delle sostanze in atmosfera, cioè il momento della giornata (giorno o notte), la classe di stabilità, la temperatura, la velocità del vento, e l'intensità di irraggiamento solare. Gli altri parametri, pur sempre importanti nella valutazione delle aree di impatto, quali l'umidità ecc., sono stati fissati a valori costanti e rappresentativi di situazioni "medie". I valori numerici da assegnare ai diversi parametri sono stati ricavati dall'elaborazione di numerosi dati storici registrati dalle stazioni meteorologiche situate sul territorio nazionale [8] ed in particolare sono state adottate:

- quattro classi di stabilità atmosferica, due in condizioni diurne (A e D) e due in condizioni notturne (D ed F);
- tre valori della velocità del vento (compresi tra 0.5 e 7 m/s) congruentemente con i valori ammissibili per ciascuna classe di stabilità, e quindi diversi da classe a classe;
- quattro valori di temperatura ambiente (compresi tra -10 e 40 °C), anche questi in maniera congruente con i valori medi riportati dalle statistiche e riferiti rispettivamente alle condizioni diurne e notturne.

Per inciso si ricorda che, da quanto detto sopra, la temperatura ambiente, oltre ad influenzare la dinamica della formazione (contenuto di vapore e aerosol) e le modalità di dispersione della nube, influisce anche direttamente sulla portata di rilascio attraverso la pressione all'interno del serbatoio (pari alla tensione di vapore del liquido alla temperatura di stoccaggio).

La conformazione del terreno circostante il luogo del rilascio viene solitamente caratterizzata mediante un parametro fittizio che va sotto il nome di "rugosità" o "scabrezza" (in inglese "roughness"). Questo parametro assume un valore che mediamente è pari a 1/10 della massima dimensione degli oggetti presenti nella zona di interesse (alberi, edifici, apparecchiature, ecc.). Nelle simulazioni in oggetto, avendo assunto che il rilascio avvenga all'interno di un'area industrializzata, si è adottato un unico valore, pari a quello solitamente suggerito per tali situazioni e cioè 0.3 metri.

Nelle Tabella 2 sono riepilogati tutti i valori adottati per i vari parametri nelle diverse condizioni assunte:

Tab. 2: Schema riassuntivo dei valori adottati per le simulazioni

Periodo	Classe di stabilità	Vento (m/s)	Temperatura (°C)	D foro (mm)	Irraggiamento (W/m ²)
Giorno	A	0.5; 1.5; 2.5	-5; 10; 25; 40	10; 30; 50	700
	D	5; 6; 7			300
Notte	D	3; 5; 7	-10; 0; 10; 20		0
	F	0.5; 1.5; 2.5			0

3. RISULTATI

La modellizzazione della dispersione è stata effettuata utilizzando il software di analisi delle conseguenze Trace 9 della Safer Systems LLC che tiene automaticamente conto della presenza di aerosol scegliendo momento per momento il modello matematico più adatto a simulare la dispersione della nube.

3.1 Acido cloridrico

Nel caso dell'acido cloridrico ($T_{eb} = -85$ °C) tutta la portata rilasciata vaporizza completamente e forma la nube che si disperde sotto l'effetto del vento.

I principali risultati delle simulazioni hanno riguardato le massime distanze di impatto, sia sottovento (D) che in direzione trasversale al vento (W), per le due concentrazioni di riferimento (ERPG 2 = 20 ppm e IDLH = 50 ppm), ottenute al variare dei diversi parametri di input adottati (vento, temperatura, diametro del foro) per le 4 condizioni di stabilità atmosferica considerate (A giorno, D giorno, D notte, F notte).

Il confronto diretto degli andamenti in funzione velocità del vento delle distanze sottovento (D) e delle semi-ampiezze in direzione trasversale (W), in corrispondenza della concentrazione pari all'IDLH, per le diverse condizioni di stabilità atmosferica analizzate, sono riportati in Fig. 1a. Andamenti analoghi si ottengono per l'ERPG 2.

Le distanze massime di impatto (sia in direzione sottovento, che in direzione trasversale) diminuiscono sempre all'aumentare di v , indicando che un aumento della velocità del vento è favorevole alla dispersione della sostanza. Questo risultato era atteso e concorda con tutti gli andamenti già noti in quanto una maggiore velocità del vento tende a favorire una più rapida dispersione della nube, e quindi a fornire distanze di impatto minori (ovvero, in altri termini, concentrazioni più basse a parità di distanza percorsa). Questo effetto si dimostra particolarmente marcato nelle condizioni di alta stabilità atmosferica (classe F di Pasquill) e soprattutto a partire da bassi valori di velocità del vento v (dalla figura, nel passaggio da $v = 0.5$ a 1.5 m/s).

Per quanto riguarda l'effetto della temperatura ambiente (Fig. 1b), si riscontra un costante aumento delle distanze di impatto relative al limite IDLH, sia sottovento che trasversali. Per questa sostanza, a parte effetti trascurabili nella dispersione vera e propria, la diversa temperatura di stoccaggio modifica la portata rilasciata, per mezzo della diversa pressione presente nel serbatoio, e quindi agisce prevalentemente sul quantitativo di sostanza sversato. Si può osservare, inoltre, come mentre per le altre classi di stabilità gli andamenti sono decisamente lineari, per la classe F questo non si verifica.

I risultati ottenuti per i diversi valori del diametro del foro, sono riportati in Fig. 1c, sempre relativamente ai valori corrispondenti all'IDLH: l'effetto di questo parametro è immediato, in quanto esso influisce direttamente sulla portata effluente dal serbatoio ed un suo aumento porta quindi ad una maggiore estensione delle zone di impatto sia sottovento che in direzione trasversale.

Tenendo conto opportunamente dei valori che i diversi parametri assumono nelle varie classi di stabilità, l'esame della Fig. 1 consente pure di analizzare l'effetto della stabilità atmosferica.

Da un primo confronto tra le due classi corrispondenti alle condizioni diurne, cioè A e D-giorno, si osserva che, in linea generale, alla classe D corrisponde sempre una distanza leggermente maggiore in direzione del vento, ma una corrispondente massima distanza trasversale inferiore. Il primo risultato è congruente con la maggiore instabilità della classe A che comporta un più rapido mescolamento della nube con l'aria e quindi una più rapida diluizione della nube sotto vento, compatibilmente con il più elevato valore dei coefficienti di Pasquill-Gifford relativi a tale condizione. Nella direzione

trasversale, invece, evidentemente l'effetto della velocità assoluta del vento è preponderante, e la bassa velocità associata alla classe A non è sufficiente ad “allungare” la nube, la quale staziona in prossimità del punto di rilascio generando una nube più “circolare” e di dimensioni trasversali superiori.

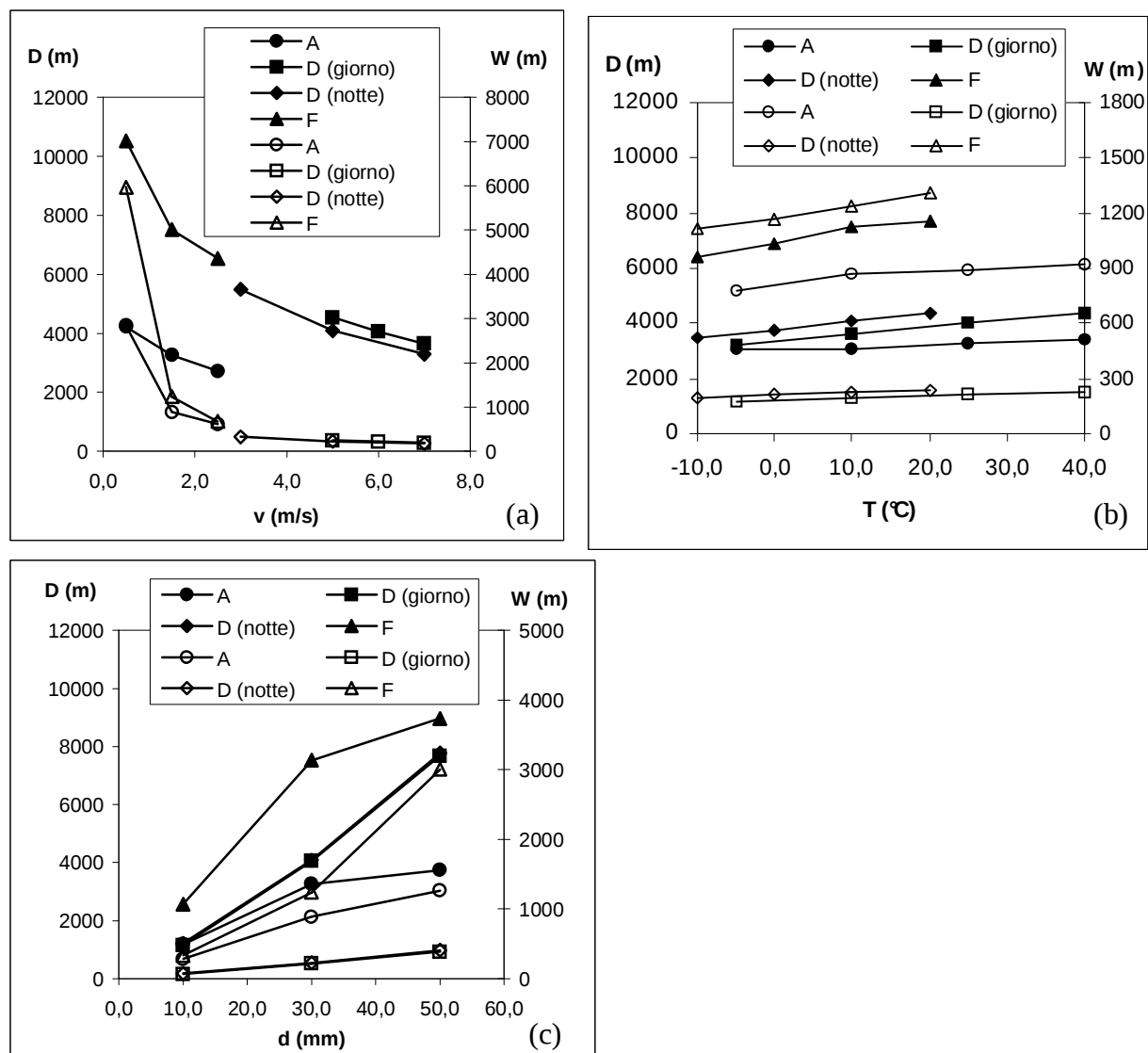


Figura 1. Andamenti delle distanze raggiunte dalla nube di HCl di concentrazione limite pari all'IDLH, sottovento (D = simboli pieni) e in direzione trasversale al vento (W = simboli vuoti), in funzione della classe di stabilità atmosferica e: a) della velocità del vento; b) della temperatura; c) del diametro del foro di rilascio.

Analoghe considerazioni valgono per le due classi esaminate in condizioni notturne: D-notte ed F. In questo caso si nota come la maggiore stabilità della classe F (e quindi i corrispondenti minori coefficienti di dispersione di Gifford) comporti una maggiore distanza assiale, ma, a causa della minore velocità assoluta del vento, anche le distanze trasversali sono, in questo caso, nettamente superiori al caso D.

Vale la pena evidenziare come, data la combinazione di caratteristiche corrispondenti a tale classe di stabilità, la classe F è quella che in assoluto presenta le massime distanze, sia assiali che trasversali, e quindi, come sovente accade, può essere adottata come “condizione peggiore possibile”.

Nelle Tabelle 3-5, sono riportati i parametri di correlazione lineare relativi alle diverse variabili di input investigate:

Tab. 3: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della velocità del vento

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	v (m/s)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	-647	-1206	-752	-1111,5
	r^2	0,999	0,846	0,973	0,840
D giorno	m	-728	-36	-447	-24,5
	r^2	0,998	0,997	0,997	0,996
D notte	m	-900,25	-51,75	-549,25	-38
	r^2	0,974	0,960	0,974	0,956
F	m	-4756,5	-4061,5	-1993,5	-2647
	r^2	0,851	0,823	0,920	0,828

Tab. 4: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della temperatura

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	T (°C)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	21,066	4,193	8,713	3,08
	r^2	0,995	0,932	0,956	0,903
D giorno	m	43,34	1,826	25,786	1,153
	r^2	0,999	0,997	0,997	0,995
D notte	m	48,41	2,03	30,04	1,3
	r^2	0,999	0,998	0,999	0,995
F	m	73,32	10,75	45,35	6,77
	r^2	0,962	0,990	0,959	0,992

Tab. 5: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della dimensione del foro

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	d (mm)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	861,5	294,25	639,75	245,25
	r^2	0,818	0,954	0,885	0,981
D giorno	m	2519	119,5	1630,2	80
	r^2	0,998	0,998	0,995	0,998
D notte	m	2517,5	123,25	1639	84
	r^2	0,997	0,997	0,994	0,997
F	m	2179,5	997	1599,2	668
	r^2	0,759	0,956	0,909	0,966

Come si può osservare dalle tabelle precedenti, per le classi neutre si ottengono andamenti lineari praticamente per tutti i parametri analizzati (r^2 scende a circa 0,96 solo nel caso della classe D notte e in funzione del vento, mentre negli altri casi è sempre superiore a 0,99). Le classi A ed F, invece, presentano andamenti non esattamente lineari, specie con riferimento all'effetto del diametro del foro di uscita.

3.2 Ammoniaca

A differenza del caso dell'HCl, la temperatura normale di ebollizione dell' NH_3 ($-33\text{ }^\circ\text{C}$), è tale che il contenuto termico all'atto del rilascio non è sufficiente per la sua completa vaporizzazione istantanea. Di conseguenza, solo una parte della corrente rilasciata subisce il *flash* immediato, un'altra frazione resta sospesa sotto forma di goccioline molto piccole (*aerosol*), formando insieme alla precedente la nube, mentre la restante parte forma la pozza di liquido. L'evaporazione dalla pozza, dipende anch'essa dalle condizioni esterne quali la temperatura dell'aria, del terreno, la velocità del vento, e così via, e il loro effetto si sovrappone a quello dei parametri che influenzano direttamente la dispersione della nube.

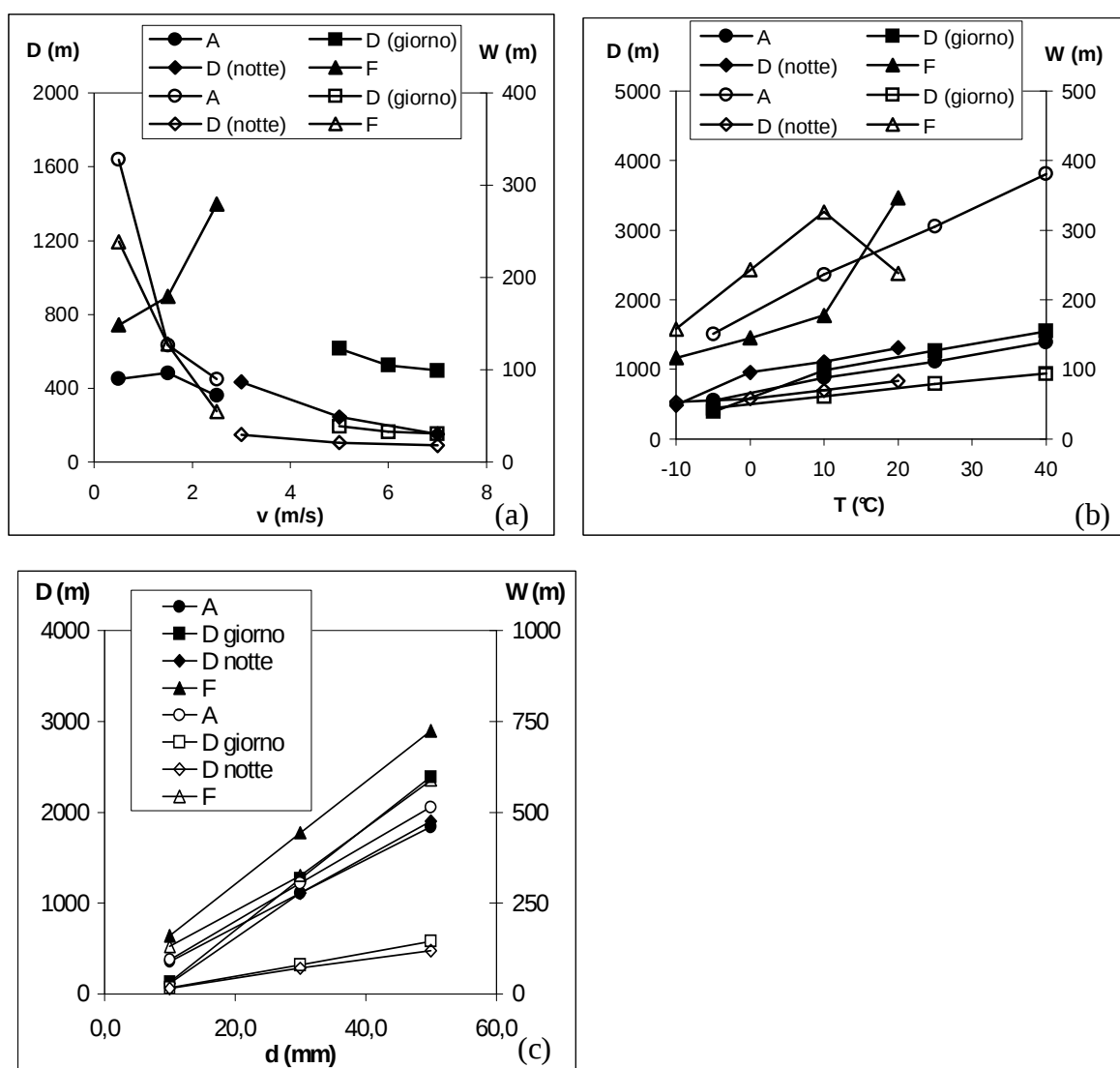


Fig.2. Andamenti delle distanze raggiunte dalla nube di NH_3 di concentrazione limite pari all'IDLH, sottovento (D = simboli pieni) e in direzione trasversale al vento (W = simboli vuoti), in funzione della classe di stabilità atmosferica e: a) della velocità del vento; b) della temperatura; c) del diametro del foro di rilascio.

I risultati ottenuti, in corrispondenza all'IDLH, in termini di distanze sottovento (D) e di semi-ampiezze in direzione trasversale (W), per i valori di velocità del vento e le condizioni di stabilità atmosferica analizzate sono riportati in Fig. 2a; andamenti analoghi si ottengono per l'ERPG 2.

Le distanze massime di impatto (sia in direzione sottovento, che in direzione trasversale) diminuiscono all'aumentare di v , indicando che un aumento della velocità del vento è favorevole alla dispersione della sostanza. Si riscontra tuttavia un effetto diverso per la classe di stabilità F, in cui l'aumento della velocità del vento inizialmente riduce la distanza di impatto sottovento, come negli altri casi analizzati, ma ulteriori incrementi di questa variabile provocano invece un suo aumento. La ragione di questo diverso comportamento sta nel fatto che, da un lato, una maggiore velocità del vento tende a favorire una più rapida dispersione della nube formata, e quindi a fornire distanze di impatto minori (ovvero, in altri termini, concentrazioni più basse a parità di distanza percorsa), come riscontrato per le altre classi di stabilità; dall'altro lato, a causa della presenza della pozza, aumenta anche il coefficiente di scambio di materia e quindi valori maggiori di v favoriscono l'evaporazione dalla pozza con conseguente incremento della portata che alimenta la nube. Questo effetto si dimostra particolarmente marcato nelle condizioni di alta stabilità atmosferica (classi E ed F di Pasquill) e di bassi valori di velocità del vento v .

Dai risultati ottenuti al variare di T (Fig. 2b), si riscontra un costante aumento delle distanze di impatto, sia sottovento che trasversali. La temperatura di stoccaggio influisce sulle distanze di danno attraverso più meccanismi: oltre che sull'incremento di portata rilasciata, dovuto alla maggiore pressione presente nel serbatoio, essa agisce direttamente anche sulla frazione di flash e sulla velocità di evaporazione dalla pozza. Entrambi questi ultimi fenomeni sono favoriti da un aumento di temperatura e questo spiega l'incremento della distanza di impatto all'aumentare della temperatura T . Anche in questo caso si può rilevare il comportamento diverso che si ottiene per la classe di stabilità F, in cui l'effetto dell'aumento della temperatura, passando da 10 a 20°C si traduce in un aumento marcato della distanza di impatto sottovento ed in una leggera diminuzione di quella in direzione trasversale al vento.

I risultati ottenuti per i diversi valori del diametro del foro, sono riportati in Fig. 2c: l'effetto di questo parametro è immediato, in quanto esso influisce direttamente sulla portata effluente dal serbatoio ed un suo aumento porta quindi ad una maggiore estensione delle zone di impatto sia sottovento che in direzione trasversale.

Tenendo conto delle corrispondenti variazioni dei diversi parametri corrispondenti ad ogni classe di stabilità, l'esame della Fig. 2 consente pure di analizzare l'effetto di della stabilità atmosferica. Si osserva come, per bassi valori di velocità del vento (classi di stabilità A e F) la distanza di impatto sottovento risulta maggiore per il caso di atmosfera stabile (F) mentre la distanza trasversale risulta maggiore per il caso di atmosfera instabile (A). Per valori di velocità del vento più elevati, la classe D fornisce distanze di impatto maggiori, sia sottovento che in direzione trasversale, in condizioni diurne, essenzialmente per la maggiore temperatura che aumenta il tasso di evaporazione. Nel complesso, la classe di stabilità F appare comunque quella che fornisce i risultati maggiormente conservativi ai fini delle distanze di sicurezza.

Nelle Tabelle 6-8, sono riportati i parametri di correlazione lineare relativi alle diverse variabili di input investigate.

Dall'esame delle tabelle si può notare come i coefficienti r^2 siano prossimi all'unità per le correlazioni in funzione della dimensione del foro e assumano nella gran parte dei casi valori soddisfacenti per le correlazioni in funzione della temperatura e della velocità del vento, ad eccezione del caso di classe di stabilità atmosferica F, per la quale risultano molto bassi, soprattutto per la distanza di impatto sottovento, evidenziando un comportamento più complesso rispetto a quello lineare.

Tab. 6: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della velocità del vento

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	v (m/s)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	-470	-374	-395	-338.5
	r^2	0.969	0.865	0.957	0.851
D giorno	m	-188	-12	-134	-9.5
	r^2	0.999	0.997	0.999	0.999
D notte	m	-192.5	-13.75	-135.75	-11
	r^2	0.974	0.969	0.987	0.967
F	m	-367.5	-417.5	42.5	-221
	r^2	0.139	0.931	0.005	0.993

Tab. 7: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della temperatura

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	T (°C)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	28.56	6.52	18.31	5.06
	r^2	0.993	0.999	0.995	0.998
D giorno	m	33.86	1.27	24.96	1.12
	r^2	0.977	0.984	0.959	0.998
D notte	m	34.75	0.92	26.09	1.02
	r^2	0.944	0.759	0.932	0.966
F	m	121.71	5.29	72.18	3.23
	r^2	0.879	0.796	0.817	0.369

Tab. 8: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della dimensione del foro

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	d (mm)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	50.125	13.425	37.15	10.5
	r^2	0.999	0.999	0.999	0.999
D giorno	m	84.225	4.275	56.525	3.2
	r^2	0.999	0.999	0.999	0.999
D notte	m	63.8	3.425	44.7	2.6
	r^2	0.997	0.999	0.995	0.998
F	m	98.7	13.025	56.425	11.45
	r^2	0.997	0.989	0.999	0.992

3.1 Trimetilammina

La temperatura normale di ebollizione della trimetilammina è di 3 °C. Ciò comporta che, in alcune delle condizioni di rilascio investigate, vale a dire quelle a $T < 3$ °C, la sua tensione di vapore sia inferiore alla pressione atmosferica. In questi casi è stata prevista la pressurizzazione del recipiente di stoccaggio, in modo che la pressione interna non sia mai inferiore a quelle esterna e la sostanza possa così liberamente fuoriuscire. Non sono stati presi in considerazione, in questo studio, aspetti legati alla resistenza meccanica del contenitore stesso.

Sempre in base alle proprietà fisiche della sostanza, risulta che la frazione di vaporizzato (flash + aerosol) è pari al 39% circa, in condizioni diurne, ed al 4 %, in condizioni notturne.

In base a quanto già riscontrato nel caso dell'ammoniaca, si può prevedere che il comportamento della dispersione sia sempre più segnato dalla dinamica del liquido nella pozza, rispetto alla nube che si forma immediatamente all'atto del rilascio.

Le distanze sottovento (D) e le semi-ampiezze in direzione trasversale (W), per la concentrazione IDLH, ottenute al variare dei parametri considerati sono riportate in Fig. 3.

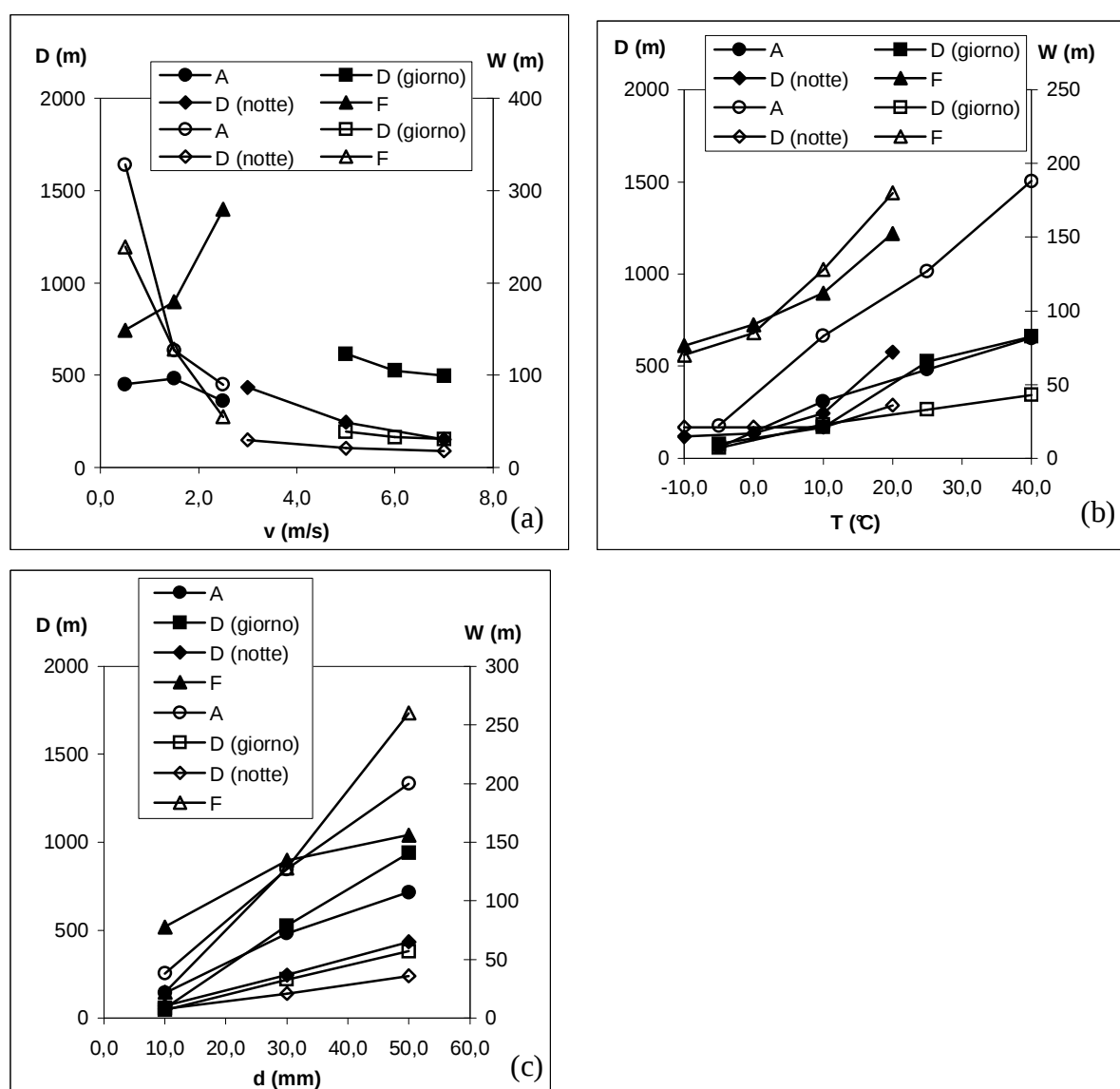


Fig.3. Andamenti delle distanze raggiunte dalla nube di trimetilammina per la concentrazione limite corrispondente all'IDLH, sottovento (D = simboli pieni) e in direzione trasversale (W = simboli vuoti), in funzione della classe di stabilità atmosferica e: a) della velocità del vento; b) della temperatura; c) del diametro del foro di rilascio.

Come si può osservare dalla Fig. 3, per questa sostanza alcuni degli andamenti delle distanze di impatto in funzione dei parametri analizzati differiscono sostanzialmente rispetto a quanto già riscontrato per le due sostanze precedenti. Ad esempio, nel caso della velocità del vento v , in particolare, per la classe F, in tutto il campo di variazione di v si osserva un aumento delle distanze di impatto in direzione assiale invece di una riduzione, come ci si poteva attendere. Ciò è dovuto prevalentemente alla dinamica dell'evaporazione dalla pozza. Infatti, ricordando la temperatura di ebollizione della trimetilammina e il fatto che alla classe F corrispondono condizioni notturne (quindi irraggiamento solare pari a zero e bassa temperatura), la frazione della portata effluente che resta in fase sospesa (4%) è molto bassa, per cui il grosso della nube proviene appunto dal vapore che si libera dalla pozza di liquido che resta sul terreno. La velocità di evaporazione da quest'ultima è favorita da una maggiore velocità del vento, ed evidentemente la stabilità atmosferica non riesce a disperdere la nube in maniera sufficientemente rapida.

Anche per la dipendenza dalla temperatura si riscontrano alcune differenze rispetto agli andamenti prima osservati. In particolare, si nota come l'andamento crescente che in precedenza era, con una sola eccezione, decisamente lineare, in questo caso presenta spesso un andamento parabolico con concavità verso l'alto. Anche questo comportamento è essenzialmente legato alla presenza della pozza di liquido, la cui tensione di vapore (che dipende appunto da T) influisce sulla velocità di evaporazione. Questo effetto è reso particolarmente importante dal fatto che, data la temperatura di ebollizione normale, i dati corrispondenti a $T < 3^\circ\text{C}$ sono ottenuti per una pressione di rilascio costante e pari a 1 bar, per cui, per questi dati, non vale l'effetto della maggiore portata rilasciata dovuto alla maggiore tensione di vapore del liquido stoccato.

Nelle Tabelle 9-11, sono riportati i parametri di correlazione lineare relativi alle diverse variabili di input investigate:

Tab. 9: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della velocità del vento

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	v (m/s)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	-78,5	-146	-45,5	-119
	r^2	0,721	0,87	0,50	0,86
D giorno	m	-86	-5	-59	-4
	r^2	0,909	0,949	0,915	0,923
D notte	m	-91,75	-3,5	-70,5	-3
	r^2	0,936	0,644	0,961	0,923
F	m	502	-203,5	327	-92
	r^2	0,972	0,914	0,913	0,986

Tab. 10: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della temperatura

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	T ($^\circ\text{C}$)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	17,59	4,647	13,02	3,61
	r^2	0,993	0,997	0,990	0,996
D giorno	m	20,65	1,03	14,05	0,79
	r^2	0,973	0,976	0,947	0,984
D notte	m	20,54	0,78	14,89	0,45
	r^2	0,785	0,729	0,810	0,6
F	m	39,34	3,88	20,02	3,73
	r^2	0,909	0,987	0,945	0,950

Tab. 11: Parametri di correlazione delle distanze di impatto in funzione della dimensione del foro

Classe di stabilità	Parametro	ERPG 2 (150 ppm)		IDLH (300 ppm)	
	d (mm)	D (m)	W (m)	D (m)	W (m)
A	m	197	52,75	142,75	40,5
	r^2	0,986	0,994	0,988	0,996
D giorno	m	316,5	16,75	220,25	12,5
	r^2	0,998	0,999	0,998	0,999
D notte	m	169	11,25	91	7
	r^2	0,993	0,992	0,999	0,998
F	m	183,25	75,75	130,25	59,5
	r^2	0,845	0,996	0,936	0,996

4. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti nel presente lavoro non sono ancora sufficienti a trarre conclusioni generalizzabili a priori a qualunque sostanza e ulteriore lavoro è necessario per estendere sia l'intervallo di variazione dei parametri investigati che il tipo di sostanza. Tuttavia, al solo scopo di avere una idea generale del confronto tra le diverse sostanze analizzate, e tralasciando l'accuratezza delle interpolazioni lineari, si può osservare che per quanto riguarda la dipendenza dalla velocità del vento, questa riduce fortemente la massima distanza di impatto nel caso dell'HCl, ma sempre meno passando all'ammoniaca ed alla trimetilammina, con alcuni casi in cui addirittura si ha l'effetto contrario (pendenza positiva).

Nonostante la molteplicità di azioni che la temperatura presenta sul rilascio e sulla dispersione, si osserva che la pendenza delle rette di interpolazione non presenta delle variazioni notevoli tra una sostanza e l'altra con valori mediamente superiori passando dalla trimetilammina all'HCl.

Sebbene i coefficienti di correlazione siano sempre molto elevati, i corrispondenti coefficienti di pendenza per la dipendenza dal diametro di rilascio presentano per le diverse sostanze andamenti molto variabili senza evidenziare una chiara tendenza (molto alti per HCl, ma più bassi per NH₃ rispetto a C₃H₉N, indipendentemente dalla temperatura di ebollizione normale).

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto "Rilascio di sostanze tossiche in atmosfera; previsione, prevenzione e protezione della salute umana" finanziato dall'ISPESL e dal Ministero della Salute. Si ringrazia inoltre Giulia Napolitano che ha svolto gran parte del lavoro computazionale.

RIFERIMENTI

1. Lees, F.P., Loss Prevention in the Process Industries, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 1996.
2. CCPS, Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd edition, AIChE, New York, 2000.
3. Piccolo, D., Statistica, Il Mulino, Bologna, Italy, 1998.
4. Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K.P.S., Sensitivity analysis of model output: an improvement of the FAST method, EUR 17338 EN, JRC Ispra, Italy, 1997.
5. Ang, A.H.S., Tang, W.H., Probability concepts in engineering planning and design, John Wiley and Sons, 1975.
6. Helton, J.C. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal, Reliability engineering and system safety, 42, pp. 327-367, 1993.
7. Murphy, J.F., Zimmermann, K.A., Making RMP hazard assessment meaningful, Process Safety Progress, vol. 17, N. 4, pp. 238-242, 1998.
8. ISTAT, Statistiche meteorologiche anni 1984-1991, Annuario n.25. Roma, 1994.