

MODELLI SEMPLIFICATI SORGENTE-DIFFUSIONE-ESPLOSIONE DI NUBI DI VAPORE IN AMBIENTI INDUSTRIALI SEMICONFINATI

Stefano Baldacci*, Fabio Fineschi°, Marcello Mossa Verre^

*ARPAT Area Prevenzione Rischi Industriali, Via Marradi 114, 57100 Livorno, ITALY

°Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria meccanica, nucleare e della produzione,
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa, ITALY

^ARPAT – Dipartimento di Pisa, Via Veneto, 56100 Pisa, ITALY

s.baldacci@arpat.toscana.it

1. SOMMARIO

Sono stati sviluppati una serie di modelli semplificati che permettono di ottenere distanze di danno di esplosioni di nubi di vapori a quattro livelli di sovrappressione, nelle categorie di stabilità D5 e F2 e nel caso di presenza o assenza di bacino di contenimento attorno al contenitore di stoccaggio. I modelli sono stati ottenuti applicando l'analisi multivariata a modelli più complessi reperibili in letteratura; sono stati poi validati per tredici gas infiammabili e mostrano un ottimo accordo con i risultati delle simulazioni ottenute con i software commerciali. La tecnica adottata può essere estesa a tutti i gas infiammabili liquefatti o compressi che non possono essere trattati nella modellistica più complessa, magari solo perché manca qualche dato marginale.

2. INTRODUZIONE

La stima delle conseguenze di un'esplosione di una nube di gas all'interno di un sito industriale è estremamente complessa. Essa presuppone, infatti, di avere risolto tutta la catena logica che unisce il modello sorgente al modello diffusivo e a quello di esplosione. Ciò significa formulare, per ogni elemento della catena, una serie di ipotesi, spesso anche di estremo dettaglio [1].

La definizione dei parametri caratteristici di tutta la catena, ed in particolare dell'esplosione, risulta, quindi, complicata: è difficile dire, ad esempio, se una miscela aria-idrocarburo svilupperà una deflagrazione o una detonazione, dato che ciò dipenderà da molti parametri, come il grado di confinamento, la presenza di ostacoli, ecc. Per alcuni aspetti l'analista di rischio prende parte alla loro individuazione in modo soggettivo, in relazione all'esperienza maturata.

Sono stati introdotti un certo numero di metodi per la valutazione delle conseguenze delle esplosioni (TNT point source e TNT distributed source, TNO Multi-Energy e Baker-Strehlow), alcuni basati su una massiccia serie di simulazioni di Computational Fluid Dynamics (CFD) validate con dati sperimentali. Questi metodi offrono correlazioni e diagrammi che sono parametrizzati rispetto all'energia di esplosione, l'energia di innesco, la presenza di ostacoli e il grado di confinamento. In essi l'analista di rischio è obbligato a scegliere la classe e il tipo di esplosione (deflagrazione o detonazione) e può farlo solo se in possesso di una conoscenza approfondita di tutti gli elementi sopra descritti.

Sulla base dei documenti ARPAT [2][3], in cui vengono forniti gli elementi necessari per la definizione del termine sorgente, si è pensato di sviluppare alcuni modelli shortcut, limitati ad ambienti industriali semiconfinati, in modo da proporre una standardizzazione degli elementi utili per lo sviluppo del modello di diffusione e del modello di esplosione, con esplicito riferimento alla situazione reale di impianto.

In questo modo si può rendere disponibile all'utente uno strumento standard per la valutazione delle conseguenze di un'esplosione in ambienti parzialmente confinati, quali quelli tipici di raffinerie ed impianti petrolchimici, laddove siano presenti apparecchiature e tubature, senza obbligare l'analista di rischio a sviluppare il modello sorgente, il modello di diffusione e la pesante applicazione di uno dei metodi più generali descritti sopra.

Per formulare la revisione del metodo speditivo italiano per la valutazione delle conseguenze incidentali [4][5], fra i modelli disponibili sul mercato erano già stati scelti, sulla base di sedici criteri di valutazione [2], Unified Dispersion Model (UDM) del Phast 6.1 della DNV Technica [6][4] e il metodo Multi-Energy del TNO [7][8]. Fra le metodiche analitiche utilizzabili per ottenere modelli shortcut da UDM e Multi-Energy, se ne sono individuate due, l'analisi dei residui e la matrice di correlazione, che sembravano ad una prima analisi dei modelli complessi particolarmente promettenti, specie se la quantità immagazzinata di sostanza pericolosa è fissata, ma la cui applicabilità deve essere comunque verificata a posteriori.

A questo punto si hanno tutti gli elementi per sviluppare e testare i modelli shortcut, simulando le conseguenze dal rilascio fino all'esplosione ancora con i modelli UDM e Multi-Energy.

Come per il metodo speditivo, le sostanze possono essere raggruppate in classi determinate sulla base delle principali proprietà chimico-fisiche che governano lo scenario di esplosione; in questo modo la tecnica può essere estesa a tutti i gas infiammabili compressi o liquefatti per compressione e/o refrigerazione che non possono essere simulati nei modelli complessi per insufficienza di dati.

I modelli shortcut possono essere utilizzati per la verifica delle analisi di rischio [9][10][11][12], la pianificazione territoriale [13] e la pianificazione delle emergenze [2], costituendo una risorsa alternativa ai pacchetti software commerciali, spesso costosi e di non facile reperimento.

Prima di ricavare i modelli shortcut, nei paragrafi 3-6, si è provveduto a descrivere le equazioni fondamentali e le variabili su cui si fondano i modelli complessi in base alle quali sono stati sviluppati i modelli semplificati.

3. LA VAPORIZZAZIONE DA POZZA A SEGUITO DEL RILASCIO DI GAS

3.1 Geometria della pozza e bilancio di materia

Si immagini un serbatoio adibito allo stoccaggio di un gas liquefatto mediante compressione, raffreddamento oppure sotto pressione. In caso di fessurazione nei primi due casi è possibile che si formi una pozza di gas liquefatto che subisce evaporazione. La forma della pozza viene schematizzata come un cilindro circolare di raggio $r(t)$ e spessore uniforme $h(t)$, con una sorgente puntuale localizzata nel suo centro. La massa della pozza varia nel tempo secondo la relazione

$$M_{pool}(t) = \pi r^2(t) h(t) \rho_L \quad (1)$$

che può ricavarsi altresì integrando l'equazione di bilancio di materia:

$$\frac{dM_{pool}}{dt} = S(t) - E_{vap}(t) - E_{sol}(t) \quad (2)$$

3.2 Allargamento della pozza

A propria volta il raggio della pozza è dipendente dal tempo e viene calcolato integrando numericamente l'equazione

$$\frac{dr}{dt} = [2g(h - h_{min})]^{1/2} \quad (3)$$

3.3 Vaporizzazione da pozza

Per calcolare il rateo di evaporazione della pozza deve essere innanzitutto determinata la temperatura del liquido in modo da poter distinguere tra liquidi surriscaldati e liquidi non surriscaldati. La temperatura della pozza T_{pool} all'istante t viene calcolata integrando rispetto al tempo la seguente espressione derivata direttamente dall'equazione di bilancio di energia

$$\frac{dT_{pool}}{dt} = \frac{Q_{net}}{M_{pool} C_{pL, pool}} \quad (4)$$

Il flusso netto di calore viene ottenuto dal bilancio di energia sul liquido della pozza:

$$Q_{net} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{sol} + Q_{spill} - Q_{evap} \quad (5)$$

dove i vari contributi al flusso di calore sono ricavabili dalle seguenti relazioni:

$$Q_{cond} = 2\pi\theta \int_0^{r(t)} \frac{r' dr'}{(t - t')^{1/2}} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\chi_s k_s (T_{surf} - T_{pool})}{(\pi \alpha_s)^{1/2}} \quad (7)$$

$$Q_{conv} = \lambda_{air} Nu \frac{\pi r^2}{L} (T_a - T_{pool}) \quad (8)$$

$$Nu = \begin{cases} 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} & Re < 320\,000 \\ 0.037 Pr^{1/3} [Re^{0.8} - 15200] & Re > 320\,000 \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{rad} = Q_{solar} + Q_{long} \quad (10)$$

$$Q_{solar} = \pi r^2 S \quad (11)$$

$$Q_{long} = \varepsilon \sigma (T_a^4 - T_{pool}^4) \pi r^2 \quad (12)$$

$$Q_{spill} = S(t) \left[C_{pL,spill} (T_{spill} - T_K) - C_{pL,pool} (T_{pool} - T_K) \right] \quad (13)$$

$$Q_{evap} = 0.014 \pi S c^{-0.67} (u_{a,(z=1m)})^{0.25} r^{1.89} \Delta H_{v,pool} \frac{M_c P_a}{RT_{pool}} \ln \left(\frac{P_a}{P_a - P_{v,pool}^c} \right) \quad (14)$$

Il raggio della pozza è costante nel caso della presenza di un bacino di contenimento oppure perché la pozza ha raggiunto lo spessore minimo oltre il quale cessa di accrescere le proprie dimensioni.

Dopo aver calcolato la temperatura del liquido che forma la pozza, il rateo di evaporazione viene determinato in maniera distinta se il liquido è surriscaldato oppure no.

Liquido surriscaldato

$$Q_{boil} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{sol} + Q_{spill} \quad (15)$$

$$E_{vap} = \frac{\max\{Q_{boil}, 0\}}{\Delta H_{v,pool}} \quad (16)$$

Liquido non surriscaldato

$$E_{vap} = \frac{Q_{evap}}{\Delta H_{v,pool}} \quad (17)$$

4. ACCOPPIAMENTO DELLA VAPORIZZAZIONE DA POZZA E DELLA DISPERSIONE DELLA NUBE MEDIANTE IL MODELLO UDM

La dispersione in atmosfera della nube di vapore o gas rilasciato dalla pozza o direttamente fuoriuscito dal contenimento viene simulata con il Phast 6.1 mediante il modello UDM (Unified Dispersion Model) che prende in considerazione tutti i fenomeni caratteristici di un rilascio bifase quali:

- l'iniziale dispersione a jet
- l'evaporazione e la ricondensazione con ricaduta al suolo di gocce
- la formazione e la vaporizzazione della pozza
- l'allargamento della nube e l'iniziale dispersione come gas pesante
- la successiva transizione alla dispersione come gas neutro

Per coprire tutti gli stadi del rilascio viene utilizzato un solo profilo di concentrazione e le transizioni del modello sono smussate in modo automatico. La Figura 1 mostra l'andamento della nube nella direzione del vento e le coordinate cartesiane x,y,z utilizzate per rappresentarla.

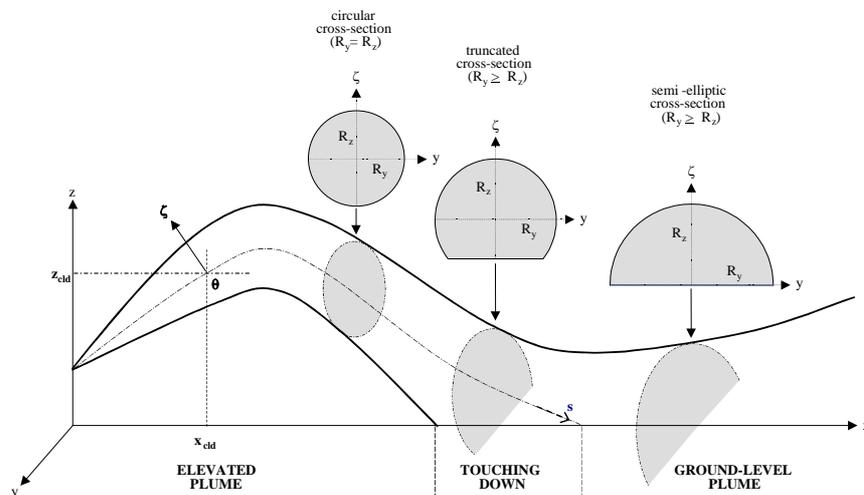


Figura 1 - Schematizzazione geometrica di un rilascio continuo secondo UDM

5. LA DISPERSIONE DELLA NUBE DI VAPORI INFIAMMABILI CON UDM

La forma dei profili assunti generalizza quella suggerita da Ooms et al. [14] e migliorata da Webber et al. [15]. Il profilo di concentrazioni è dato da:

$$c(x, y, \zeta) = c_o(x) F_v(\zeta) F_h(y) \quad (18)$$

$$F_v(\zeta) = \exp \left[- \left(\frac{\zeta}{R_z(x)} \right)^{m(x)} \right] \quad (19)$$

$$F_h(y) = \exp \left[- \left(\frac{y}{R_y(x)} \right)^{m(x)} \right] \quad (20)$$

I coefficienti di scala valgono:

$$R_y = \sqrt{2} \sigma_y \quad \text{e} \quad R_z = \sqrt{2} \sigma_z \quad (21)$$

6. MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DI ESPLOSIONI REPERITI IN LETTERATURA ED UTILIZZATI A LIVELLO INDUSTRIALE

6.1 Il metodo TNO Multi-Energy

Il terzo segmento da modellare nel nostro caso è quello dell'esplosione. Il modello TNO Multi-Energy è basato sull'ipotesi che le conseguenze pericolose derivino solo dall'esplosione della parte di nube parzialmente confinata: la quantità di energia rilasciata durante una VCE viene limitata dal volume della porzione di nube infiammabile parzialmente confinata. Il volume all'interno della zona parzialmente confinata viene considerato semisferico con una miscela gas-aria omogenea e stechiometrica e un'energia di combustione generalmente pari a $3.5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$. L'esplosione è simulata numericamente dal TNO con un codice di trasporto a flusso corretto.

Il TNO presenta i risultati di questa modellazione mediante una famiglia di curve (Figura 2) che legano una pressione adimensionale alla distanza scalata con l'energia di combustione:

$$\bar{R} = R * \left(\frac{P_0}{E} \right)^{1/3} \quad (22)$$

$$\bar{P}_s = \frac{P_s}{P_0} \quad (23)$$

I limiti e le delicate ipotesi che occorre assumere per applicare questo e gli altri metodi sono stati oggetto di uno specifico approfondimento. Questi metodi, infatti, offrono una serie di soluzioni possibili che vanno specificate in funzione della "initial blast strenght" oppure della velocità di fiamma che, come abbiamo avuto già occasione di affermare, è funzione del grado di confinamento oltre che della sostanza.

Nella maggioranza dei casi in ambito industriale non si hanno mai deflagrazioni o detonazioni "pure", nel senso che l'ambiente non è mai totalmente in campo aperto e neppure completamente confinato o confinato con sfiato.

Per questo motivo si è ritenuto utile porre l'attenzione sullo studio del grado di confinamento tipico dell'ambiente chimico industriale degli impianti di processo e, partendo dai risultati della revisione del metodo speditivo italiano, sono stati derivati alcuni modelli semplificati che fornissero il valore di varie soglie

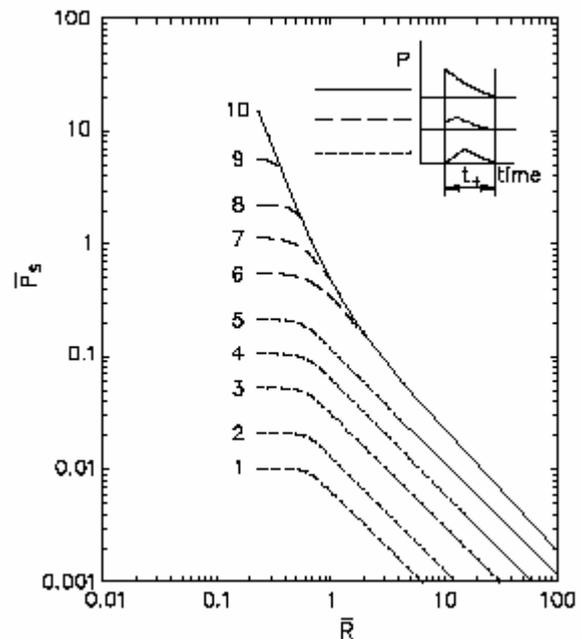


Figura 2 - TNO Multi-Energy Model: variazione della pressione adimensionale con la distanza scalata

Tabella 1 - Classificazione dei gas infiammabili [2]

Classi			Tipo di sostanza	Caratteristiche	Ulteriori caratteristiche
2	2.1	2.1.1	Gas infiammabili	Liquefatti per compressione	Teb>-8°C
		2.1.2			Teb<-8°C
	2.2	-		Liquefatti per refrigerazione	/
	2.3	-		Semplicemente compressi	/

di sovrappressione per gas liquefatti per compressione, gas liquefatti per refrigerazione e gas in pressione a partire semplicemente dalla conoscenza della quantità di sostanza detenuta, dalla coppia (stabilità atmosferica)/(velocità del vento), dalla presenza o meno del bacino di contenimento.

I modelli semplificati descrivono la successione dei fenomeni del rilascio (modello sorgente), diffusione (sia neutra che pesante) con formazione della nube esplosiva ed infine esplosione.

7. ANALISI ED IDENTIFICAZIONE DI MODELLI SHORTCUT

7.1 Premessa

L'obiettivo di ottenere una migliore comprensione fenomenologica e teorica di un'esplosione in ambiente industriale e la messa a punto di strumenti di rapido utilizzo capaci di restituire l'ordine di grandezza delle sovrappressioni raggiunte, in modo da guidare, alla luce dei danni rilevati, l'investigazione delle cause e del comportamento dell'esplosione è di grande rilevanza per l'analisi post-incidentale. Per cercare di rispondere a questa esigenza sono stati sviluppati alcuni modelli shortcut per la valutazione delle conseguenze di esplosioni di nubi di vapori infiammabili in ambiente semiconfinato. L'applicazione del metodo shortcut fornisce la stima delle distanze di danno per due tipologie di eventi incidentali, rappresentative di molte condizioni impiantistico-gestionali e particolarmente significative per l'analisi di rischio, la pianificazione territoriale e quella di emergenza: la prima è caratterizzata da probabilità relativamente alta e magnitudo contenuta, ma comunque rilevante (denominata ipotesi più probabile); la seconda è associata a probabilità di accadimento più remote e termini di sorgente di media gravità ed è tipica di eventi incidentali rilevanti, ma pur sempre credibili (denominata ipotesi media). Per ciascuna ipotesi incidentale sono fornite le distanze di danno alle soglie standard dell'evento modellato (elevata letalità, inizio letalità, lesioni irreversibili, lesioni reversibili), nelle condizioni meteorologiche D5 ed F2.

7.2 Criteri di classificazione delle sostanze

Il metodo shortcut classifica le sostanze secondo le loro caratteristiche di pericolosità generalmente significative ai fini della valutazione delle conseguenze (Tabella 1 per i gas infiammabili).

7.3 Modalità di detenzione o tipologie di stoccaggio

Il metodo shortcut presentato prende in considerazione le seguenti tipologie di stoccaggio o modalità di detenzione:

- stoccaggio con bacino di contenimento (si ammette che il bacino di contenimento sia tale, per geometria e volume, da contenere l'intera quantità di sostanza che fuoriesce);
- stoccaggio senza bacino di contenimento.

Esso non si applica quindi a:

- trasporto con Autobotti / Ferrocisterne (ATB/FC);
- trasporto mediante condotta;
- trasporto per via d'acqua.

7.4 Ipotesi incidentali e relativi scenari

Partendo dalle tipologie impiantistiche o di trasporto più comuni per le sostanze pericolose esaminate e dalle rotture tipiche attese (dimensione della rottura e durata del rilascio), come prescritte in alcune norme specifiche di riferimento [10][11] per condizioni impiantistico-gestionali ottimali, o riportate in letteratura, sono stati individuati i termini di sorgente da introdurre nei modelli di simulazione per le due condizioni meteorologiche di riferimento (D5 e F2). Tutti gli eventi sono ricondotti ad una perdita ed al conseguente

Tabella 2 - Valori di soglia della normativa italiana [13]

Scenario incidentale	1 Elevata Letalità	2 Inizio letalità	3. Lesioni irreversibili	4. Lesioni reversibili
VCE - UVCE (sovrapressione di picco)	0,3 bar (0,6 spazi aperti)	0,14 bar	0,07 bar	0,03 bar

rilascio nell'ambiente circostante di sostanze pericolose.

7.5 Valori di soglia

Ai fini dell'applicazione del metodo shortcut il danno è correlato all'effetto fisico mediante il criterio di vulnerabilità rappresentato dal superamento di un valore di soglia, Tabella 2.

7.6 CALCOLO DELLE CONSEGUENZE

7.6.1 Parametri chimico-fisici fondamentali per ogni scenario incidentale

Per acquisire la necessaria sensibilità per la valutazione critica dei risultati sono stati studiati i modelli utilizzati dal Phast e quindi identificati i parametri chimico-fisici che per ogni fenomeno fisico influenzano maggiormente il raggio di danno finale. Di seguito si riportano, per ogni fenomeno di interesse, i parametri identificati.

EVAPORAZIONE DA POZZA

I parametri fondamentali che regolano il fenomeno di evaporazione da pozza per i liquidi surriscaldati sono:

Peso molecolare	Calore latente di vaporizzazione [J/kg];
Tensione di vapore a 20°C [N/m ²]	Calore specifico [J/kg*K].
Coefficiente di diffusione [m ² /s]	

Nel caso di liquidi non surriscaldati invece, i parametri prescelti per descrivere il fenomeno sono:

Peso molecolare	Coefficiente di diffusione [m ² /s]
Tensione di vapore a 20°C [N/m ²]	

DISPERSIONE

Il parametro fondamentale che regola il fenomeno della diffusione è la densità della nube [kg/m³].

UVCE

I parametri fondamentali che influenzano il raggio di danno per lo scenario del UVCE sono:

LFL e UFL [%v/v]	Calore di combustione [kJ/kg]
------------------	-------------------------------

L'entità dell'esplosione, fortemente influenzata dalla presenza di ostacoli all'interno della nube, dal grado di confinamento e dal livello di energia dell'innesco, è anche funzione della "burning velocity" effettiva. Vista la difficoltà di reperire dati affidabili relativamente a questa grandezza, nelle simulazioni si ipotizza che una parte della nube (30%) rimanga parzialmente confinata e dia luogo ad una esplosione con "initial blast strenght" elevata (classe 7), mentre la restante parte dia luogo a deflagrazione con "initial blast strenght" minima (cl. 2).

7.6.2 Condizioni meteorologiche utilizzate nelle simulazioni

Partendo dalle tipologie impiantistiche o di trasporto più comuni per le sostanze pericolose esaminate e dalle rotture tipiche attese (dimensione della rottura e durata del rilascio), sulla scorta di quanto prescritto in alcune norme specifiche di riferimento [12] per condizioni impiantistico-gestionali ottimali, o riportate in

Tabella 3 - dati relativi alle classi di stabilità atmosferica ed alle condizioni meteo

Parametro	D5	F2
Temperatura atmosferica	15 °C	9.85 °C
Umidità relativa	70%	70%
Rugosità superficiale	607 mm	607 mm
Radiazione solare	0.8 kW/m ²	0.1 kW/m ²

Tabella 4 - Elenco delle sostanze cui si sono applicati i modelli semplificati

2_1_1 N. CAS	Gas infiammabili liquefatti per compressione ($T_{eb} > -8^{\circ}C$)	2_1_2 N. CAS	Gas infiammabili liquefatti per compressione ($T_{eb} < -8^{\circ}C$)	2_2 N. CAS	Gas infiammabili liquefatti per refrigerazione	2_3 N. CAS	Gas infiammabili semplicemente compressi
106-99-0	Butadiene(1,3-) ⁽¹⁾	74-86-2 7664-41-7 7784-42-1	Acetilene* Ammoniaca ⁽¹⁾ Arsina	74-86-2 7664-41-7 7784-42-1 19287-45-7	Acetilene* Ammoniaca ⁽¹⁾ Arsina Boroetano ⁽¹⁾ Butadiene(1,3-) ⁽¹⁾	74-86-2 7664-41-7 7784-42-1 19287-45-7	Acetilene Ammoniaca ⁽¹⁾ Arsina Boroetano ⁽¹⁾ Butadiene(1,3-) ⁽¹⁾
106-97-8 106-98-9	Butano(n-) Butene	75-28-5	Butano(i-)	75-28-5 106-97-8 106-98-9	Butano(i-) Butano(n-) Butene	75-28-5 106-97-8 106-98-9	Butano(i-) Butano(n-) Butene
75-00-3	Cloroetano	460-19-5 75-19-4	Cianogeno ⁽¹⁾ Ciclopropano	106-99-0 460-19-5 75-19-4 75-00-3	Carbonio monossido ⁽¹⁾ Cianogeno ⁽¹⁾ Ciclopropano Cloroetano	630-08-0 460-19-5 75-19-4 75-00-3	Carbonio monossido ⁽¹⁾ Cianogeno ⁽¹⁾ Ciclopropano Cloroetano
124-40-3	Dimetilammina ⁽¹⁾	75-37-6	Difluoroetano	75-37-6 124-40-3	Difluoroetano Dimetilammina ⁽¹⁾	75-37-6 124-40-3	Difluoroetano Dimetilammina ⁽¹⁾
75-04-7 75-21-8	Etilammina ⁽¹⁾ Etilen ossido ⁽¹⁾	115-10-6 74-84-0	Dimetiletere Etano	115-10-6 74-84-0	Dimetiletere Etano	115-10-6 74-84-0	Dimetiletere Etano
		7803-51-2	Fosfina ⁽¹⁾	75-04-7 75-21-8 74-85-1 7803-51-2	Etilammina ⁽¹⁾ Etilen ossido ⁽¹⁾ Etilene Fosfina ⁽¹⁾	75-04-7 75-21-8 74-85-1 7803-51-2	Etilammina ⁽¹⁾ Etilen ossido ⁽¹⁾ Etilene Fosfina ⁽¹⁾
115-11-7	Isobutilene	7783-06-4	Idrogeno solforato ⁽¹⁾	7783-06-4 115-11-7	Idrogeno solforato ⁽¹⁾ Isobutilene	7783-06-4 115-11-7	Idrogeno solforato ⁽¹⁾ Isobutilene
74-93-1	Metil mercaptano ⁽¹⁾	74-87-3	Metil cloruro ⁽¹⁾	74-82-8 74-87-3	Metano Metil cloruro ⁽¹⁾	74-82-8 74-87-3	Metano Metil cloruro ⁽¹⁾
74-89-5	Metilammina	74-99-7	Metilacetilene	74-93-1 74-99-7 74-89-5	Metil mercaptano ⁽¹⁾ Metilacetilene Metilammina	74-93-1 74-99-7 74-89-5	Metil mercaptano ⁽¹⁾ Metilacetilene Metilammina
		463-49-0 59355-75-8	Propadiene Propadiene-metil acetilene*	463-49-0 59355-75-8	Propadiene Propadiene-metil acetilene*	463-49-0 59355-75-8	Propadiene Propadiene-metil acetilene*
75-50-3 593-60-2	Trimetilammina Vinil bromuro	74-98-6 115-07-1	Propano Propilene	74-98-6 115-07-1 75-50-3	Propano Propilene Trimetilammina	74-98-6 115-07-1 75-50-3	Propano Propilene Trimetilammina
		75-01-4 75-02-5 75-38-7	Vinil cloruro Vinil fluoruro Vinilidene fluoruro	593-60-2 75-01-4 75-02-5 75-38-7	Vinil bromuro Vinil cloruro Vinil fluoruro Vinilidene fluoruro	593-60-2 75-01-4 75-02-5 75-38-7	Vinil bromuro Vinil cloruro Vinil fluoruro Vinilidene fluoruro

NOTE

(*) sostanze che non sono state simulate con il Phast

(1) sostanza tossica

letteratura, sono stati individuati i termini di sorgente da introdurre nei modelli di simulazione per le due condizioni meteorologiche di riferimento (F2 e D5). Si riportano in Tabella 3 i parametri atmosferici impiegati nelle simulazioni relativi alle classi di stabilità di Pasquill-Gifford D ed F.

7.7 Scelta del migliore modello shortcut

Il miglior modello shortcut è quello che, approssimando sufficientemente (per esempio, con errori relativi inferiori al 5%) il modello complesso, è il più semplice, nel senso che stabilisce una dipendenza funzionale semplice (per esempio, una relazione lineare) della variabile dipendente con il minor numero possibile di variabili indipendenti. Per ottenere questo modello si è seguita questa procedura:

- 1) Si è assunto, una volta fissata la classe di appartenenza (Tabella 4) e la quantità immagazzinata delle sostanze, la presenza del bacino di contenimento e la condizione meteo, una dipendenza funzionale lineare tra il raggio di danno alla i-esima soglia e i parametri identificati nel paragrafo precedente

$$R_i = f(MW, p_{v, 20^{\circ}C}, T_{eb}, C_{P, NBP}, \Delta H_{vap}, LEL, UEL, \Delta H_{COMB})$$

- 2) Si è ipotizzato che i parametri fisici che influiscono meno sul fenomeno sono proprio quelli per cui la dipendenza funzionale non è lineare
- 3) Si sono trovati questi parametri, ricorrendo al metodo della matrice di correlazione, e si sono esclusi dai successivi passaggi
- 4) Si è costruita, con il metodo della pseudo-inversa, la relazione lineare che lega il raggio di danno con i parametri che non sono stati esclusi
- 5) Si è verificato con l'analisi dei residui se questa relazione lineare rappresenta in modo soddisfacente il modello complesso

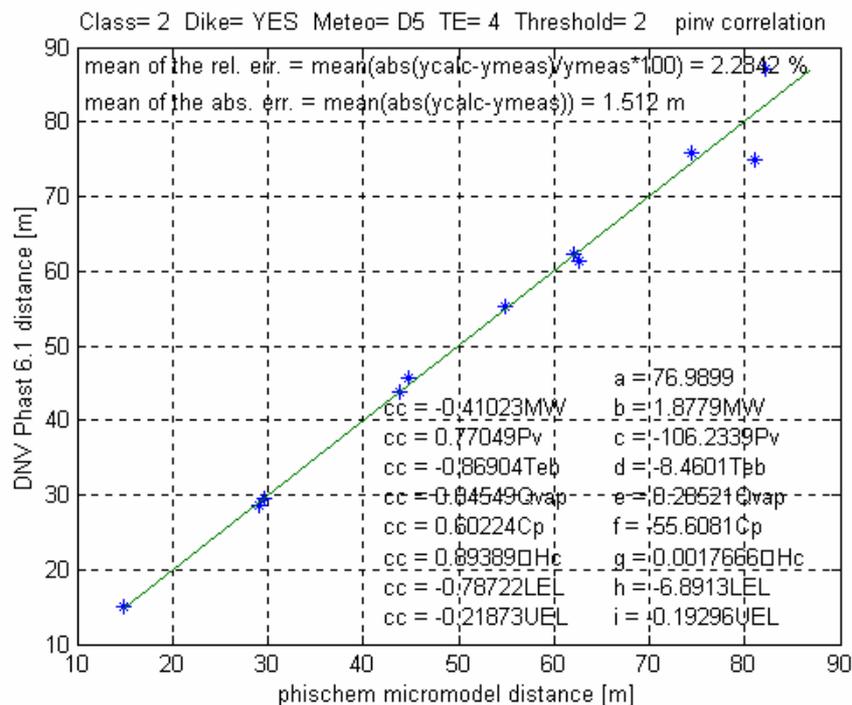


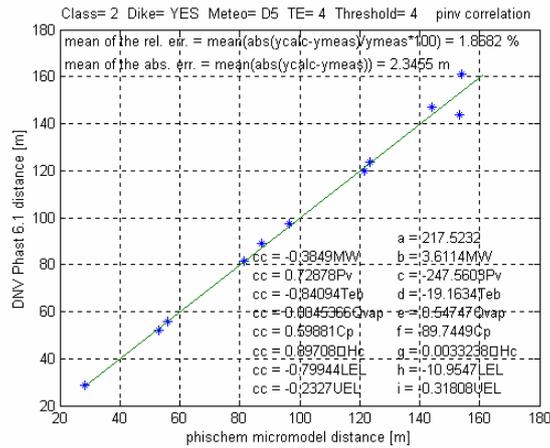
Figura 3 - DNV PHAST 6.1 .vs. shortcut model diagonal plot per gas liquefatti per compressione

Il risultato è stato positivo, confermando la bontà delle ipotesi assunte.

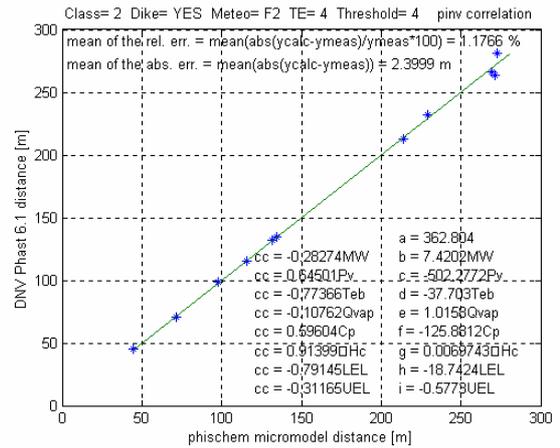
La Figura 3 confronta il raggio di danno calcolato con il modello shortcut con quello calcolato con Phast 6.1 per la classe dei gas liquefatti per compressione in D5, con bacino di contenimento e sovrappressione di soglia (0.14 bar). L'errore relativo è inferiore al 3%. All'interno del grafico sono riportati (1) i valori dei coefficienti di correlazione relativi alle funzioni lineari con cui il raggio di danno è legato ad ogni singolo parametro fisico, (2) i valori dei coefficienti della relazione lineare tra raggio di danno e parametri fisici che esprime il modello shortcut. Si nota, ad esempio, che le variabili Qvap e UEL hanno un basso coefficiente di correlazione lineare; ciò significa che i due vettori non possono essere utilizzati con successo per spiegare la variabilità del raggio di danno mediante una relazione lineare. Per questo motivo nella versione finale del micromodello tali variabili non compariranno.

Sono riportati nella pagina seguente (Figura 4) grafici dello stesso tipo, sempre per una quantità di 100t, ricavati per soglie e condizioni meteo diverse. Ogni punto rappresenta una sostanza della classe 2.1.1 dei gas infiammabili liquefatti per compressione con temperatura di ebollizione normale maggiore di -8°C .

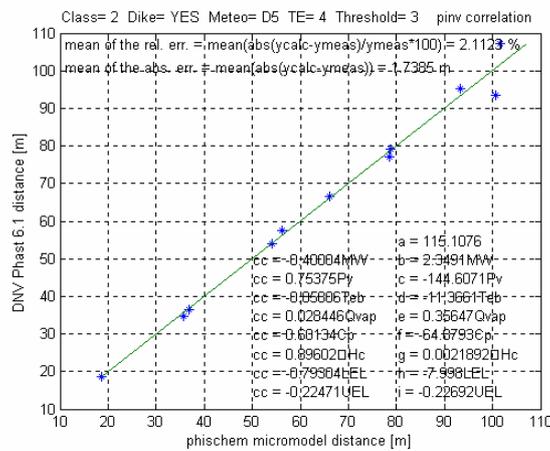
In alto nei vari grafici sono riportati la media dell'errore relativo e la media dell'errore assoluto. L'utilizzatore, una volta individuato il caso specifico fissando quantità detenuta (cui è legata una coppia tempo/diametro della rottura - coppia t/ϕ), presenza o meno del bacino di contenimento (DIKE/NODIKE), coppia meteo (D5 o F2), soglia di sovrappressione a cui determinare la distanza di danno (1-4), potrà utilizzare la correlazione inserendo i parametri chimico fisici richiesti oppure la versione grafica. È interessante notare che i micromodelli dovrebbero essere in grado di fornire una stima delle distanze di danno anche per le sostanze, che pur appartenendo alla stessa classe, non sono state simulate e quindi non hanno contribuito alla costruzione del modello.



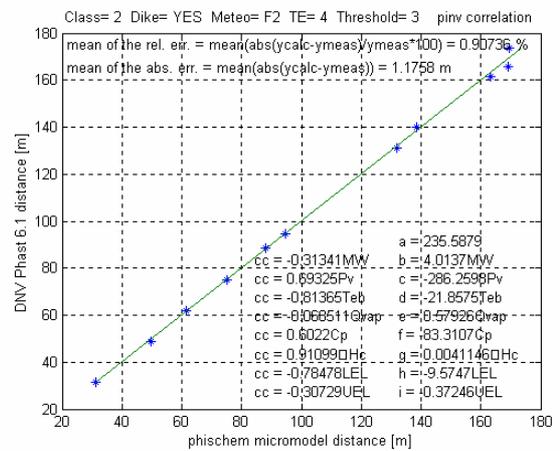
a)



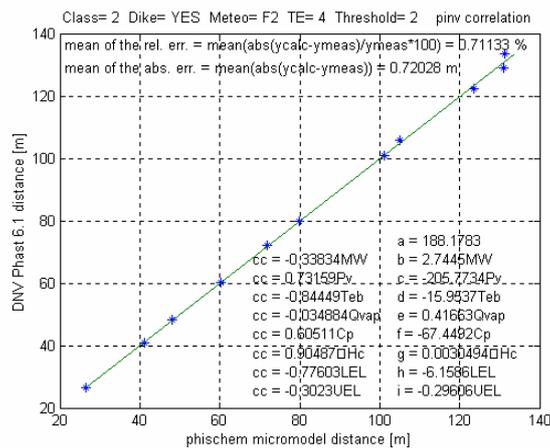
b)



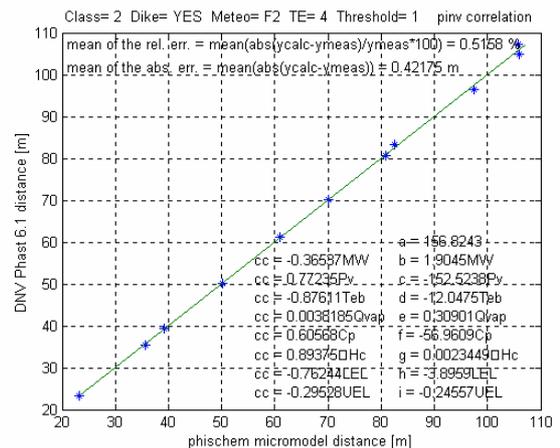
c)



d)



e)



f)

Figura 4 - DNV PHAST 6.1 vs. shortcut model diagonal plot per gas liquefatti per compressione. Rappresentazione dei raggi di danno di esplosioni per il caso 100t, DIKE con D5/F2 e le 4 soglie (1=0.3bar, 2=0.14bar, 3=0.07bar, 4=0.03bar)
a) D5 0.03bar; b) F2 0.03bar; c) D5 0.07 bar; d) F2 0.07 bar; e) F2 0.14bar; f) F2 0.3bar

8. CONCLUSIONI

Sono stati ottenuti una serie di modelli semplificati per la stima delle distanze di danno di esplosioni semiconfiniate di nubi di vapori infiammabili ai quattro livelli di pressione richiesti dalla normativa (da 0.3 a 0.03 bar) per sostanze appartenenti alle classi di gas infiammabili liquefatti per compressione, liquefatti per refrigerazione e semplicemente compressi, e per un ampio intervallo di quantità immagazzinate. I micromodelli per le tre classi indicate sono stati ricavati per le coppie meteo D5 e F2 e per la presenza o meno del bacino di contenimento.

I raggi di danno variano considerevolmente da caso a caso e i valori ottenuti sono molto vicini a quelli del modello Phast 6.1 della DNV Technica preso a riferimento in sostituzione della realtà (errori relativi inferiori al 5%).

In considerazione della elevata concordanza di risultati, i micromodelli risultano adatti alla verifica preliminare dei Rapporti di Sicurezza, alla pianificazione territoriale e d'emergenza ed ogniqualvolta non si disponga di un software che permetta di simulare rilascio-diffusione-esplosione.

ELENCO DEI SIMBOLI

c	concentrazione,	[kg di componente/m ³]
c _o	concentrazione di centro linea,	[kg di componente/m ³]
C _{pL}	calore specifico del liquido	[J/kg K]
C _{pL,spill}	calore specifico del liquido spillato	[J/kg K]
C _{pL,pool}	calore specifico del liquido alla temperatura della pozza	[J/kg K]
E	energia totale disponibile	[J]
E _{sol} (t)	rate of dissolution on water	[kg/s]
E _{vap} (t)	evaporation rate	[kg/s]
F _h (x)	funzione di distribuzione orizzontale per la concentrazione	[-]
F _v (ζ)	funzione di distribuzione verticale per la concentrazione	[-]
g	accelerazione gravitazionale	[m/s ²]
h	pool thickness	[m]
h _{min}	minimum pool thickness	[m]
k _s	thermal conductivity of the surface	[W/m K]
L	pool diameter	[m]
m	exponent of horizontal distribution function for concentration	[-]
M _{pool}	massa della pozza	[kg]
M _c	molecular weight of the spilled liquid	[kg/kmol]
n	exponent of vertical distribution function for concentration	[-]
Nu	Nusselt number	[dimensionless]
P _a	atmospheric pressure	[N/m ²]
P ₀	pressione ambiente o atmosferica	[N/m ²]
P _S	peak side-on overpressure - sovrappressione di picco	[N/m ²]
\bar{P}_S	pressione di picco dimensionale	[-]
Pr	Prandtl number = $C_{pa}\mu_a/\lambda_a$	[-]
P _v ^α (T)	saturated vapour pressure as function of temperature T for compound α,	[Pa]
P _v ^c	saturated vapour pressure of spilled liquid	[N/m ²]
Q _{boil}	heat flow rate per liquido surriscaldato	[W]
Q _{cond}	heat flow rate from conduction	[W]
Q _{conv}	heat flow rate from convection	[W]
Q _{evap}	heat flow rate from evaporation	[W]
Q _{long}	rate of heat input/loss in, from long-wave radiation	[W]
Q _{net}	net rate of heat input/loss	[W]
Q _{rad}	heat flow rate from solar radiation	[W]
Q _{sol}	heat flow rate from dissolution	[W]
Q _{solar}	heat flow rate from solar radiation	[W]
Q _{spill}	heat flow rate from spilled liquid	[W]
r	pool radius	[m]
R	universal gas constant = 8314	[J/K/kmol]
R	distanza dal centro dell'emisfera	[m]

\bar{R}	distanza scalata con l'energia di combustione	[-]
R_y	term in cross-wind concentration profile, $= R_y(x) = 2^{1/2}\sigma_y(x)$	[m]
R_z	term in vertical concentration profile, $R_z(x) = 2^{1/2}\sigma_z(x)$	[m]
Re	Reynolds number $= u_a(z=10m) \rho_a(2r) / \mu_a$	[-]
S	solar flux in	[W/m ²]
s	arclength along centre-line of the plume,	[m]
$S(t)$	spill rate	[kg/s]
Sc	Schmidt number for air $= \mu_a / (\rho_a D_{ac})$	[-]
t	time from (since onset) the start of the release	[s]
T_a	ambient or atmospheric temperature,	[K]
T_K	273.15	[K]
T_{pool}	pool temperature	[K]
T_{surf}	surface temperature	[K]
T_{vap}	temperature of vapour phase of the cloud,	[K]
$u_a(z=1m)$	ambient wind speed at 1 m height	[m/s]
x	horizontal downwind distance,	[m]
y	crosswind distance,	[m]
z	vertical height above ground,	[m]

Greek letters

α_s	thermal diffusivity of the surface	[m ² /s]
α	c (released component), w (water)	[-]
ΔH_v	heat of vaporisation	[J/kg]
ε	emissività della pozza	[0.95]
ζ	distance from plume centre-line,	[m]
θ	angle to horizontal of plume,	[rad]
κ	Von Karman constant, $\kappa = 0.4$	[-]
λ_{air}	is the thermal conductivity of air	[W/m/K]
ρ_a	density of ambient air, atmospheric density	[kg/m ³]
ρ_L	densità del liquido	[kg/m ³]
σ_y	standard deviation of horizontal profile of cloud concentration,	[m]
σ_z	standard deviation of vertical profile of cloud concentration,	[m]
σ	costante di Stefan-Boltzmann	[W/m ² /K ⁴].
χ_s	factor to account for surface roughness	[-]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Stefano Baldacci, Marcello Mossa Verre, et Al.. Shortcut models for the estimation of the consequences of a gas cloud explosion in industrial environment. Conference Proceedings ESREL '04/PSAM7, Berlin, June 2004
- [2] ARPAT - Revisione del “Metodo speditivo per la valutazione delle conseguenze incidentali”, di cui alle “Linee guida per la pianificazione di emergenza esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante” del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, 18 gennaio 1994. Rapporto elaborato su incarico di APAT (ex ANPA nell’ambito della convenzione n°122 del 20.03.2001. Marzo 2004.
- [3] Francesca ANDREIS, Stefano BALDACCI, Armando LOMBARDI, Francesco MAROTTA, ARPAT - Area Prevenzione Rischi industriali, ecogestione e tecnologie e per la protezione ambientale, Definizione di scenari tipici di riferimento per le simulazioni incidentali, VGR 2004, Pisa Ottobre 2004
- [4] Linee guida per la pianificazione di emergenza esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante, Dipartimento della Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri, 18 gennaio 1994
- [5] A.Ricchiuti, G.Capponi, M.Mossa Verre, F.Andreis, S.Campana, S.Baldacci, A.Scarpelli, F.Marotta. Revisione del Metodo Speditivo per la valutazione delle conseguenze incidentali Atti del Convegno Nazionale VGR 2002, Pisa, 15-17 Ottobre 2002
- [6] H.W.M. Witlox, UNIFIED DISPERSION MODEL (UDM Theory Manual CONSEQUENCE MODELLING DOCUMENTATION (UDM Version 6.0, January 2000
- [7] TNO Guide to Hazardous Industrial Activities, Ministry of the Interior, Crisis Management and Fire Directorate, The Netherlands, september 1988;
- [8] TNO report PML 1998-C53. Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations. Final report for the project “GAMES”. October 1998
- [9] DECRETO LEGISLATIVO 17 agosto 1999, n.334. Supplemento ordinario alla G.U. n.228 del 28 settembre 1999 – Serie generale. “Attuazione della Direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose”
- [10] DM 20/10/98 “Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e/o tossici”;
- [11] DM 05/11/1997 “Modalità di presentazione e di valutazione dei rapporti di sicurezza degli scali merci terminali di ferrovia”;
- [12] DM 15/5/96, “Criteri di Analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto (G.P.L.)”;
- [13] Decreto Ministeriale del 09/05/2001 - Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante
- [14] Ooms, G., Mahieu, A. P. and Zelis, F., “The plume path of vent gases heavier than air”, 1st Intl. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, The Hague, Delft, pp. 211-219 (1974
- [15] Webber, D.M., S.J. Jones, G.A. Tickle and T. Wren, “A model of a dispersing dense gas cloud and the computer implementation D*R*I*F*T. I: Near instantaneous release.” SRD Report SRD/HSE R586 April 1992, and “. . . II: Steady continuous releases.”, SRD Report SRD/HSE R587 (1992
- [16] Stefano Baldacci, Marcello Mossa Verre et Al.. Definizione di scenari tipici di riferimento per le simulazioni di eventi incidentali. Atti del Convegno Nazionale VGR 2004, Pisa 19-21 Ottobre 2004
- [17] Banca Dati Sostanze Pericolose ANPA - Roma 2001 Rev. 6;
- [18] “Mappatura del rischio industriale in Italia”, a cura dell’ANPA, Dipartimento Rischio tecnologico e Naturale, Settore “Rischio nelle Attività Industriali”, Roma Aprile 2000;
- [19] Guide to Hazardous Industrial Activities, Ministry of the Interior, Crisis Management and Fire Directorate, The Netherlands, september 1988;
- [20] Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries, IAEA-TECDOC-727, Vienna 1993;
- [21] Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Centre for Chemical Process Safety;
- [22] Whazan Version 2.1, May 1993: Process Hazards Screening tool, User Manual.
- [23] Guidelines for Process Equipment Reliability Data, Centre for Chemical Process Safety;
- [24] Lees, F. P. “Loss Prevention in the process Industries industries, Hazard identification, assessment

- and control.”, Butterworth-Heinemann, second ediction 1996;
- [25] Sito web banca dati Federchimica: http://www.federchimica.it/pagine/rep/repf_ric_01.htm
- [26] Banca dati ARPAT: Classificazione, imballaggio ed etichettatura di sostanze e preparati pericolosi - http://www.arpato.toscana.it/rischio/ri_etichettatura.html
- [27] W.E.Baker, P.A. Cox, P.S. Westine, J.J.Kulesz, R.A.Strehlow, Explosion Hazards and Evaluation, Elsevier
- [28] ARPAT. A cura di Stefano Baldacci “Rassegna degli strumenti di calcolo disponibili per la valutazione delle conseguenze” prodotta all’interno delle ricerca finanziata dall’ANPA sulla rivisitazione del “Metodo Speditivo per la valutazione delle conseguenze”. Firenze 2003
- [29] The QUEST Quarterly, Quest Consultants Inc. Oklahoma US. URL: <http://www.questconsult.com>, 2000