

ESPLOSIONE IN UN SERBATOIO DI OLI MINERALI: STUDIO DELLA DINAMICA

D. Minisini – Comando P.le VVF Udine, via Popone 55 - 33100 Udine
F. Zenier – ARTES S.r.l., via C. Battisti 2/A - 30035 Mirano (VE)

1. SOMMARIO

Viene ricostruito un incidente che ha coinvolto un serbatoio contenente oli di recupero classificabili come oli minerali di categoria C. L'evento, che è consistito in un'esplosione con proiezione di una parte del serbatoio e che non ha fortunatamente causato lesioni gravi a persone, viene studiato attraverso l'applicazione di modelli di simulazione e basandosi sull'osservazione degli effetti e dei danni riscontrati.

Particolare interesse è stato altresì posto nella valutazione della validità dell'ipotesi di innesco, connessa alla tendenza a formazione di cariche elettrostatiche nei liquidi combustibili in movimento.

L'applicazione di modelli fisico-matematici di utilizzo comune e di programmi di calcolo permette di correlare con buona approssimazione la dinamica dell'evento con le grandezze fisiche ed energetiche in gioco.

Importanza non secondaria viene attribuita inoltre ai dati ricavati dall'intervento dei Vigili del Fuoco.

Dall'analisi effettuata emerge anche lo scollamento tra le norme di sicurezza e quelle di gestione dell'attività, queste ultime derivanti da un'applicazione formale della norma e della legislazione in merito, segnalando come da questa e da altre esperienze siano scaturite rivisitazioni delle norme finalizzate a minimizzare il rischio. L'uso di strumenti di simulazione, attualmente di facile reperimento ed utilizzo, ed un approccio moderno nella impostazione dei criteri progettuali e di gestione, anche attraverso l'analisi dei rischi, risulta auspicabile sulla scorta delle indicazioni emerse dallo studio.

2. DESCRIZIONE DELL'INCIDENTE

2.1 Descrizione del deposito

L'incidente di cui si tratta nel presente studio è avvenuto nel 1994 in un deposito di stoccaggio per la raccolta di oli esausti.

Il deposito era costituito da 16 serbatoi cilindrici metallici fuori terra, così suddivisi:

- tre serbatoi ad asse verticale di capacità pari a 160 m^3 , a tetto fisso (identificati come serbatoi n° 2, 3 e 4), e uno ad asse orizzontale di capacità pari a 30 m^3 (serbatoio n°1), posti in un bacino di contenimento comune. In uno dei serbatoi di 160 m^3 , identificato come il n°4, è avvenuta l'esplosione che ha rappresentato l'evento più importante dello scenario incidentale e che ha coinvolto anche i serbatoi n°2 e 3.
- un serbatoio ad asse orizzontale di 102 m^3 ed un serbatoio ad asse verticale di 100 m^3 , posti ognuno in un singolo bacino di contenimento
- 10 serbatoi ad asse verticale, posti in due bacini di contenimento distinti e situati sul lato opposto del deposito rispetto ai primi. Tre di questi ultimi serbatoi erano gestiti da un'altra ditta.

Il deposito era inoltre dotato di una pensilina di carico/scarico per la movimentazione dei prodotti dai serbatoi di stoccaggio alle autobotti e viceversa, dotata di tubazioni e valvole di

sezionamento, e manichette per il carico dall'alto degli automezzi, carico effettuabile mediante pompa di trasferimento.

Ai fini dell'analisi dell'incidente è fondamentale evidenziare il seguente aspetto: i serbatoi utilizzati per lo stoccaggio degli oli esausti erano dotati di un duomo, nella parte superiore del tetto fisso, aperto direttamente all'atmosfera, in maniera tale che l'aria esterna (e quindi l'ossigeno) poteva penetrare liberamente all'interno del serbatoio, miscelandosi ai vapori presenti sul cielo del serbatoio. Inoltre, le pensiline di carico delle autobotti erano dotate di manichette per il carico del prodotto liquido dal boccaporto delle autobotti, ma non di collegamenti in fase gas tali da poter realizzare il "ciclo chiuso", ossia il riciclo dei vapori nel mezzo (serbatoio o autobotte) dal quale si scarica il liquido.

In definitiva, l'assetto del deposito era tale da non permettere lo scarico a ciclo chiuso dei prodotti.

Tale assetto è comunque consentito dalla norma di legge di riferimento (D.M. 31-07-1934), per depositi in cui vengano stoccati esclusivamente liquidi di categoria C (cioè con temperatura di infiammabilità superiore ai 65°C). Il certificato di prevenzione incendi, di cui il deposito era in possesso, prevedeva infatti che nel deposito venissero stoccati unicamente liquidi di categoria C, ossia liquidi combustibili, con temperatura di infiammabilità relativamente elevata. Tuttavia, le analisi di laboratorio condotte a seguito dell'incidente sul contenuto residuo dei serbatoi e sul liquido sversato, hanno evidenziato la presenza all'interno dei serbatoi stessi di sostanze, quali acetone e toluene, a bassa temperatura di infiammabilità, suscettibili quindi di formare, con l'ossigeno dell'aria, una miscela infiammabile anche a temperatura ambiente.

Un altro fattore che può aver giocato un ruolo determinante nella genesi dell'incidente è che dalla rampa di scarico era possibile far affluire il prodotto a tutti i serbatoi del deposito (fatta eccezione per uno), manovrando opportunamente le valvole di intercetto delle linee che andavano ai serbatoi. In tal modo, tutti i serbatoi potevano potenzialmente contenere sostanze volatili ed infiammabili, come peraltro dimostrato dalle analisi chimiche svolte in seguito, che hanno evidenziato la presenza degli stessi solventi in diversi serbatoi.

In conclusione, nel deposito venivano stoccate anche sostanze per le quali i serbatoi e i dispositivi di scarico non erano, per quanto concerne la sicurezza, idonei.

2.2 Dinamica dell'incidente

Viene di seguito descritta la sequenza degli eventi che ha portato al verificarsi dell'esplosione:

Il giorno dell'incidente, durante le ore precedenti l'evento, erano stati effettuati numerosi travasi da e per il serbatoio, identificato come n°4, di emulsioni oleose.

Verso le ore 14.00 entrava in deposito una autobotte (costituita da motrice e rimorchio, entrambi contenenti circa 4000 L di prodotto) che trasportava, come da bolla di accompagnamento, "acqua variamente inquinata da oli e idrocarburi". Vennero effettuate, dal magazziniere del deposito (con esito a suo dire favorevole), le analisi del campione, secondo prassi. Non esiste comunque riscontro della bontà del campione, in quanto esso è stato distrutto.

Tra le 16.00 e le 16.15 venne dato il via alle operazioni di scarico del prodotto. Dopo circa 10-15 minuti dall'inizio dell'operazione (alle 16.30 circa), avvenne un'esplosione nel serbatoio n°4.

Lo scoppio provocò il distacco del tetto del serbatoio, che venne scagliato fuori dei confini del deposito e impattò sulla strada a ridosso della recinzione, andando a cadere nelle vicinanze di una persona che transitava sulla strada, la quale rimase lievemente ferita da un

elemento metallico distaccatosi dal frammento. A seguito dell'esplosione, inoltre, parte del prodotto infiammabile contenuto nel serbatoio venne proiettato e incendiato, sia nel bacino di contenimento che sopra altri due serbatoi (anch'essi, con ogni probabilità, contenenti percentuali di solventi volatili): a causa di questo, i vapori infiammabili fuoriuscenti dai duomi dei rispettivi tetti si incendiarono. In particolare, nel serbatoio n°2 avvenne un'altra deflagrazione, seppure meno violenta della prima, come testimonia la deformazione subita dal recipiente.

Vi fu infine un ultimo scoppio, quello della tubazione di adduzione del prodotto dalla pensilina di carico al serbatoio n°1, senza particolari conseguenze, dovuta con ogni probabilità al surriscaldamento della tubazione stessa a seguito dell'incendio nel bacino di contenimento. Tale ipotesi è suffragata anche dalla simulazione effettuata con i modelli di calcolo, che porta ad escludere la rottura della tubazione per sovrappressione esterna.

La tubazione era intercettata e vuota, ma probabilmente conteneva vapori infiammabili ed aria, dato che i travasi non avvenivano a ciclo chiuso. Il cedimento si è avuto longitudinalmente al tubo di acciaio, con caratteristiche di rottura tenace, mentre la valvola in ghisa alla quale la tubazione era collegata, si è spezzata con rottura fragile a seguito dello strappo indotto dallo scoppio della tubazione.

I VVF arrivarono sul posto alle ore 16.40 circa, allertati dalla Centrale, e constatarono che nel serbatoio n°4 era avvenuta una esplosione che aveva divelto il tetto scagliandolo nella via adiacente i confini del deposito; sulla sommità di altri due serbatoi contenuti nello stesso bacino, dal duomo, fuoriuscivano delle fiamme; il bacino di contenimento dei quattro serbatoi era parzialmente interessato da incendio di sostanze liquide, verosimilmente idrocarburi. I VVF ebbero ragione dell'incendio dopo circa 20-25 minuti.

3. ANALISI DELLE CAUSE DELL'EVENTO INCIDENTALE

Particolare attenzione è stata posta alle cause che hanno portato al verificarsi dell'incidente. Come già evidenziato al punto 2.1, la causa principale risiede nel fatto che all'interno del deposito venivano stoccate e movimentate sostanze infiammabili per mezzo di apparecchiature e dispositivi di travaso non adeguati a consentire che tali operazioni avvenissero in condizioni di sicurezza. È lecito supporre che già in altri casi nel deposito fossero stati ricevuti prodotti contenenti solventi a bassa temperatura di infiammabilità (come testimoniano le analisi effettuate nei serbatoi n°2 e n°3, che evidenziano la presenza di solventi volatili quali acetone, toluene, isobutanolo in percentuali variabili dall'1,5% al 3,5%). Il fatto che lo scarico avvenisse non a ciclo chiuso, e che l'aria avesse libero accesso alla parte superiore dei serbatoi, fa supporre che, in determinate situazioni (ad es. nel caso di temperatura ambiente sufficientemente elevata, come all'epoca dell'incidente, in cui la temperatura nelle ore più calde del giorno raggiungeva i 30°C), all'interno dei serbatoi, nella fase gas, fosse presente miscela infiammabile.

In presenza di miscela infiammabile (ossia comburente+combustibile, miscelati nelle giuste proporzioni), è sufficiente l'innesco dei vapori per causare un'esplosione.

A questo punto si è passati a studiare le cause probabili di innesco che hanno portato all'accensione della miscela infiammabile presente all'interno del serbatoio, con conseguente esplosione dello stesso. Nel caso in esame, l'ipotesi più plausibile appare essere quella della formazione di cariche elettrostatiche, dovuta all'attrito del liquido lungo le pareti del tubo. I serbatoi del deposito erano dotati di collegamento elettrico equipotenziale e messa a terra, ma l'adozione di tali sistemi può rivelarsi insufficiente a scongiurare il pericolo di formazione di cariche elettrostatiche, se il sistema non è correttamente dimensionato o se le condizioni di esercizio non sono adeguate (ad es. tempi di carico molto ridotti, con conseguente aumento della velocità del fluido nelle linee).

Infatti, le cariche elettriche che si accumulano nel liquido drenano verso terra non istantaneamente, ma in un certo periodo di tempo detto “tempo di rilassamento”, che può variare da frazioni di secondo a qualche minuto. Se, durante il tempo di rilassamento, tra diversi punti della superficie del liquido oppure tra quest’ultima e la parete del serbatoio si accumula una quantità di cariche tali da superare il valore di tensione atto a generare scintille, si può venire a formare una scarica elettrica, la quale può innescare una miscela infiammabile, se l’energia di tale scarica risulta superiore all’energia minima di ignizione per vapori in aria. Inoltre, è noto anche che l’aggiunta di acqua al prodotto puro (caso assimilabile a quello in esame) comporta un aumento dei valori del campo elettrico fino a 2 o 3 volte, rispetto a quello del campo ottenuto con prodotto puro, con una intensità maggiore delle scariche elettriche.

Prendendo a riferimento quanto riportato in ref. [7], si è eseguita una stima della quantità di carica elettrica formatasi a seguito dell’attrito del liquido sulla tubazione, valutando se tale quantità di carica potesse produrre una tensione superiore a quella necessaria per generare una scintilla e calcolando inoltre l’energia della scintilla stessa, per verificare che essa fosse in grado di accendere la miscela infiammabile contenuta all’interno del serbatoio. I risultati sono riportati nelle seguenti tabelle:

Tabella 1

Tensione atto a generare scintille	350 V
Energia minima di ignizione per vapori in aria	0,1 mJ

Tabella 2

SOSTANZA	ACETONE
Portata della pompa adduzione liquido (stima)	15 m ³ /h
DN della tubazione di adduzione	80 mm
Lunghezza della tubazione di adduzione	50 m
Tempo di carico	900 s (15 min)
Tensione accumulata sulla tubazione	417 V
Energia liberata dalla scintilla	1,57 mJ

Come si nota dai dati schematizzati nelle tabelle (anche se la stima può essere considerata solo di massima) durante il carico del serbatoio, l’attrito del liquido sulle pareti della tubazione è stato con ogni probabilità abbastanza intenso da generare una quantità di cariche e quindi una tensione di scarica superiore a quella minima per la formazione di scintille (417 V contro 350 V). Inoltre, l’energia liberata dalla scintilla viene stimata in 1,57 mJ, ossia più di dieci volte superiore a quella minima di accensione di vapori infiammabili in aria. Si può quindi concludere che, verosimilmente, l’innesco del gas all’interno del serbatoio sia stato causato da una scarica elettrica prodotta a seguito di accumulo di cariche elettrostatiche.

4. SIMULAZIONE DELL’ESPLOSIONE E PROIEZIONE FRAMMENTO

La simulazione dello scoppio all’interno del serbatoio, con conseguente proiezione del frammento all’esterno dei confini del deposito è stata condotta mediante l’ausilio del pacchetto S.T.A.R. (Safety Techniques for Assessment of Risk, rel. 3.02) per Windows®, in particolare utilizzando il modello per la simulazione dello scoppio di recipienti, sviluppato sulla base di uno studio svolto dal Southwest Research Institute di S. Antonio (Texas) per conto della NASA (USA) e adattato per modellare lo scoppio di serbatoi a pressione.

Tramite le equazioni differenziali del bilancio di moto e di energia, il modello calcola la traiettoria di un frammento di cui sono note le dimensioni e l’angolo di lancio. Esso è

concepito per lo studio di esplosioni di recipienti (missili o serbatoi) con frammenti costituiti da parti del recipiente che scoppia.

Il procedimento di calcolo inizia con la determinazione delle caratteristiche del recipiente e dei parametri base, proseguendo quindi nella valutazione della distanza di proiezione del frammento e terminando con il calcolo della sovrappressione positiva e dell'impulso, calcolati in funzione della distanza dal recipiente.

Si determinano anzitutto le variabili relative all'energia in gioco, partendo dalla assunzione che la pressione massima raggiunta al cedimento del materiale sia pari a quella di rottura che viene determinata sulla base delle relazioni della Raccolta VRS (ex ANCC), punto 1.G.1. per i recipienti sferici e punto 1.D.2 per quelli cilindrici.

È importante notare che il modello in questione è adatto alla simulazione di scoppi di recipienti in pressione, quindi l'applicazione dello stesso al caso in esame va fatta con le dovute cautele e considerando i dati di output con un margine di approssimazione maggiore, per il fatto che il serbatoio del quale si tratta era un serbatoio atmosferico, idoneo a resistere a pressioni dell'ordine dei 1,5-2 bar assoluti al massimo (pressione atmosferica più pressione idrostatica del liquido).

Si è preso a riferimento, come sostanza che ha dato luogo all'esplosione, l'acetone, che risulta il più volatile fra i componenti la miscela di acqua e idrocarburi che il serbatoio conteneva.

Le variabili assunte per il calcolo sono elencate nella seguente tabella:

Tabella 3

SOSTANZA	ACETONE
Temperatura sostanza	303 K
Temperatura ambiente	303 K
Volume serbatoio	160 m ³
Lunghezza fasciame	7 m
Vol. di gas nel serbatoio	75%
Dimensioni del frammento	diam. 5,5 m
Pressione di rottura del serbatoio	2 bar (200000 Pa)
Spessore del mantello	8 mm
Angolo di partenza	65°

Il frammento in questione risulta essere il tetto del serbatoio, circolare e di diametro di circa 5,5 m. Un parametro che può influenzare la dinamica dello scoppio è la percentuale di gas all'interno del recipiente. Nel caso in esame, tale quantità è stata stimata essere circa il 75% in volume del serbatoio, ed è stata ricavata in base ai rilievi effettuati dai VVF in loco, utilizzando i dati di seguito esposti:

Tabella 4

Quantità di liquido nel bacino di contenimento a fine spegnimento VVF	22000 L circa
Quantità acqua di spegnimento VVF	10000 L circa
Contenuto finale di idrocarburi incombusti	22000 L - 10000 L = 12000 L circa
Tempo di spegnimento VVF	t = 25 min circa
Rateo di combustione di prodotti quali idrocarburi liquidi	r = 0,09 kg/m ² .s
Superficie incendiata di liquido combustibile	S = 200 m ²
Densità del liquido combustibile (stimata)	d = 850 kg/m ³

In base a questi dati, si possono svolgere le seguenti considerazioni: la velocità lineare di combustione può essere calcolata come:

$$v_1 = r/d = 1,06 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

mentre l'altezza del liquido bruciato risulta pari a :

$$h = v_1 \cdot t \cdot 60 \text{ (s/min)} = 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 60 = 0,16 \text{ m}$$

Il volume di liquido bruciato può quindi essere stimato come:

$$V = h \cdot S = 0,16 \cdot 200 = 32 \text{ m}^3 = 32000 \text{ L}$$

che, sommato alla parte di idrocarburi non combustibili, fornisce un totale di circa 44000 L, ossia 44 m³. All'incirca un quarto del volume del serbatoio era quindi occupato dal liquido, mentre la restante parte era occupata dai vapori del liquido stesso.

Altro fattore, questo invece fondamentale per la simulazione dello scenario, è l'angolo di partenza del frammento, ossia l'angolo che la traiettoria del frammento forma rispetto all'orizzontale (alla linea del terreno), nel momento del distacco. Tale dato viene richiesto come input e può influenzare notevolmente la distanza di impatto del proiettile. Nel caso in esame, data la conformazione del frammento (costituito dall'intero tetto del serbatoio), si è escluso un angolo di partenza molto stretto (inferiore ai 30°), ed è sembrato più verosimile riferirsi ad un angolo di distacco vicino ai 60°. Le considerazioni svolte sono suffragate dalle prove svolte al calcolatore, in quanto impostando un angolo di 65°, la distanza orizzontale del frammento appare collimare con quella reale. I dati di output forniti dal modello sono sintetizzati nella seguente tabella:

Tabella 5

Peso del frammento	1890 kg circa
Velocità iniziale del frammento	100,14 m/s
Velocità finale del frammento	86,4 m/s
Energia finale del frammento	7045 kJ
Massima distanza a cui arriva il frammento	34,11 m

Dai rilievi effettuati sul luogo dell'incidente, è risultato che il frammento era stato proiettato ad una distanza compresa fra i 30 e i 40 m, quindi in linea con il risultato fornito dal modello.

Il calcolo è stato ripetuto, a titolo di confronto, anche utilizzando il pacchetto SIGEM-SIMMA, in dotazione al Corpo Nazionale VVF, il quale ha fornito una distanza probabile di caduta del frammento (secondo Robinson) di 220 m, notevolmente sovrastimata rispetto a quella reale. È opportuno comunque notare che il programma è limitato in flessibilità dal fatto di non poter inserire l'angolo di partenza del frammento.

La simulazione è quindi stata completata con la valutazione delle sovrappressioni dovute alla deflagrazione. Dai tabulati di calcolo, il programma consente di ricavare due grafici rappresentanti le onde di pressione (isobare) e l'andamento della pressione in funzione della distanza. I grafici sono riportati nelle due figure seguenti:

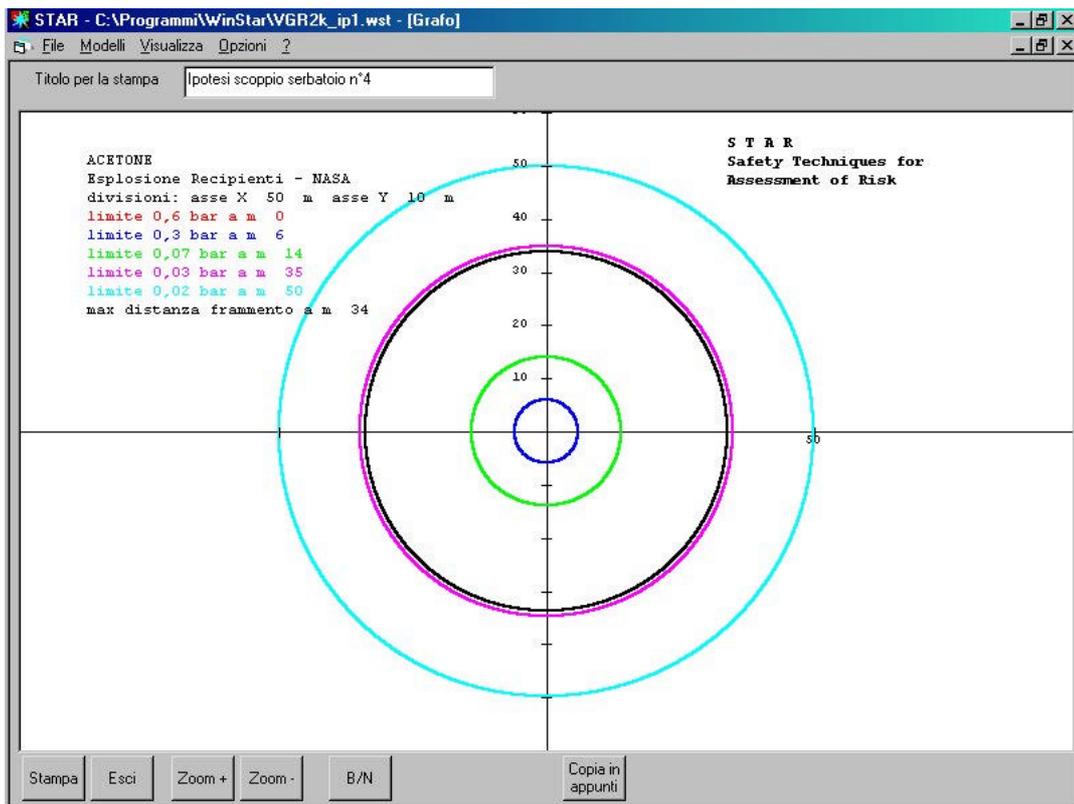


Fig. 1

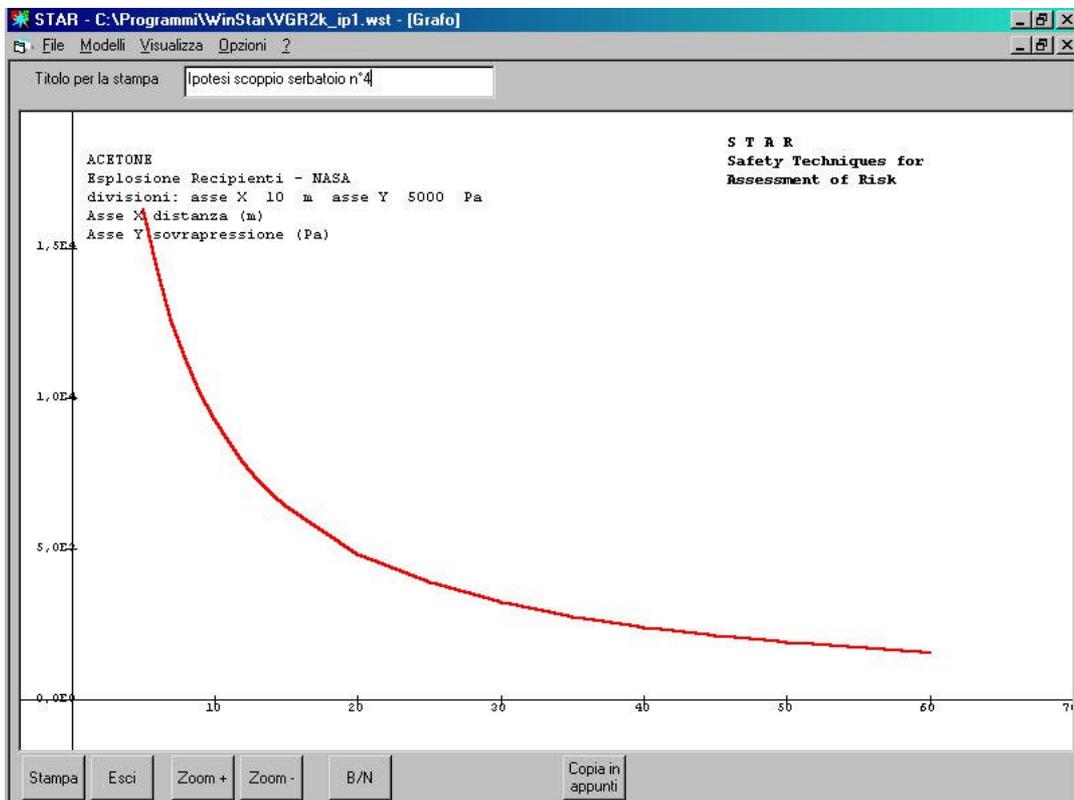


Fig. 2

Per comodità di lettura, si riportano le sovrappressioni alle varie distanze, stimate dal modello di calcolo, nella seguente tabella, in cui si sono riportati anche i valori dell'impulso (pressione per tempo, cioè durata dell'onda di pressione).

Tabella 6

SOGLIE	Distanza (m)	Valore dell'impulso (Pa•s)
Limite degli 0,6 bar	n.r.	-
Limite degli 0,3 bar	6	65
Limite degli 0,07 bar	14	29
Limite degli 0,03 bar	35	13
Limite degli 0,02 bar	50	9

Come si evince dalla tabella, la sovrappressione nel raggio di una decina di metri dal serbatoio esploso, stimabile (cfr. Fig. 2) intorno agli 0,1 bar, è sufficiente a provocare il danneggiamento di strutture in muratura leggera, quali potevano essere i sostegni delle tubazioni di alimentazione del prodotto, ma non è in grado di causare la rottura di tubazioni o di altri apparecchi, effetti per causare i quali sono necessarie sovrappressioni almeno quattro volte superiori a quelle raggiunte a seguito dell'incidente (riferendosi sempre alla distanza di 10 m circa dal serbatoio esploso). Anche in questo caso, si ha la conferma indiretta che, con tutta probabilità, lo scoppio del tratto di tubazione di adduzione (linea che alimentava un serbatoio a circa una decina di metri in linea d'aria da quello esploso), sia stato conseguenza dell'elevata temperatura raggiunta dalla tubazione stessa in seguito all'incendio del bacino di contenimento, e dall'accensione della miscela contenuta nella linea.

5. CONCLUSIONI

Val la pena di sottolineare, anche con riferimento all'episodio incidentale trattato nel presente studio, come la sensibilità in tema di sicurezza e salvaguardia dell'ambiente si sia evoluta negli ultimi anni, e come ciò abbia contribuito ad uno sviluppo e ad un aggiornamento in tema di sicurezza sia nel campo legislativo che in quello normativo, portando ad un adeguamento della normativa in materia di sicurezza, e ad una nuova ottica nella gestione stessa della sicurezza.

Con l'entrata in vigore del D.Lgs. 334/99, che ha dato slancio all'implementazione e allo sviluppo dei Sistemi di Gestione della Sicurezza (peraltro già standardizzati da alcuni anni in diverse normative europee, – ad es. BS8800 del 1996, UNI10616 e UNI10617 del 1997, ed internazionali – AS/NZS4804 del 1997), si può prevedere che il rischio dovuto ad errori operativi e/o di gestione venga sempre di più minimizzato (dato per scontato che le procedure di sicurezza vengano effettivamente poste in essere e seguite). Ciò premesso, la possibilità che l'evento incidentale si verifichi non è mai nulla: in tal caso, l'ausilio dei modelli di simulazione per la stima delle conseguenze di un possibile incidente (il cui grado di precisione appare attualmente sufficiente per una corretta valutazione di fenomeni accidentali anche non catastrofici), consente una valutazione delle distanze di impatto di un possibile evento incidentale, le quali possono essere indicative sia per la pianificazione territoriale, che per la valutazione di eventuali effetti domino (quali possono essere la proiezione di frammenti, come nel caso in esame), aspetti ad entrambi i quali viene dedicata particolare attenzione nel già citato D.Lgs. 334/99.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Loss Prevention in the Process Industries - F.P. Lees – 2nd ed. 1996
- [2] Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models - S.R. Hanna, P.J. Drivas - AIChE – CCPS (1st ed. 1987 e 2nd ed. 1996).
- [3] Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs – AIChE / Center for Chemical Process Safety (1994).
- [4] AIChE - Fundamentals of Fire and Explosion - n° 10 Vol. 73 (1977).
- [5] NASA - Workbook for Estimating Effects of Accidental Explosions in Propellant Ground Handling and Transport System - Report 3023.
- [6] NASA - Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels - Report 134906.
- [7] Rivista ANTINCENDIO, gennaio-febbraio 1982, luglio 1985, maggio 1994.
- [8] S.T.A.R. - SAFETY TECHNIQUES FOR RISK ASSESSMENT rel 3.02 per Windows® – ARTES S.R.L./PROMETEO S.R.L - MIRANO (VE)