

METODOLOGIE PER L'ANALISI DI RISCHIO. STUDIO DELLA DINAMICA DI UN INCIDENTE

F. Dattilo, E. Andriotto, C. Cusin - Comando VVF Rovigo Viale Ippodromo - RO
L. Rosa - A. Tiberio - Università di Padova - Facoltà di Ingegneria
F. Antonello - ARTES Via C. Battisti 2/A 30035 Mirano (VE)

1. SOMMARIO

Un incidente avvenuto in un deposito di GPL soggetto a notifica ai sensi del DPR 175/88 viene ricostruito attraverso l'applicazione di vari modelli di simulazione e basandosi sulle osservazioni degli effetti e dei danni riscontrati.

L'evoluzione dei fenomeni verificatisi è stata studiata scomponendo l'evenienza verificatasi in singoli eventi, applicando modelli non sofisticati disponibili sul mercato o programmi di calcolo ingegneristico, sia per ottenere riscontri sulla dinamica dell'incidente, sia per verificare la possibilità di utilizzo e la relativa efficienza di modelli di simulazione non particolarmente sofisticati in un caso complesso di incidente.

La complessità di fenomeni quali la dispersione in luoghi con ostacoli ed a bassa velocità del vento, il flash fire, il BLEVE e fire ball, oltre a richiedere adattamenti della realtà alle esigenze imposte dai modelli, risulta infatti di difficile rappresentazione con gli strumenti adottati, mentre appare improponibile l'uso di nomogrammi o strumenti semplificati di simulazione o stima.

I risultati dell'applicazione, che appaiono comunque utili per le indicazioni ricavate sulle ipotesi formulate in merito alla dinamica degli eventi, mostrano l'importanza di un approccio analitico approfondito nella valutazione del rischio e suggeriscono cautela nella interpretazione di dati forniti da strumenti o metodi semplificati.

2. DESCRIZIONE DELL'INCIDENTE

In sequenza cronologica si riporta la sintesi degli eventi più importanti.

Pochi minuti prima delle 7 del mattino si incominciava l'operazione di scarico di un'autocisterna da 52 m³. Poco dopo l'inizio dello scarico, probabilmente a seguito di un problema di bassa portata, l'addetto interveniva sulla valvola di eccesso di flusso, come già fatto altre volte, controllando e smuovendo il meccanismo di intercettazione.

Per cause ancora non accertate definitivamente si verificava una perdita dalla zona valvole dell'autocisterna, con formazione di un getto di propano, parte del quale vaporizzava per flash isoentalpico, riempiendo il cassone di alloggiamento delle valvole; la frazione residua di GPL sottoraffreddato andava a formare una pozza sul terreno asfaltato.

La vaporizzazione per flash e l'evaporazione dalla pozza, che continuava ad essere alimentata dalla perdita, generavano una nube bassa e densa che andava a coprire una vasta area del deposito. Durante questa fase, l'area dello stabilimento veniva evacuata e, verso le 7:40 si chiedeva l'intervento del Corpo nazionale Vigili del Fuoco, che inviavano immediatamente sul posto due squadre.

Poco dopo l'arrivo dei VVF, trascorsi circa 50 minuti dal manifestarsi della perdita, un innesco generava un flash-fire che interessava l'area coperta dalla nube di propano, mettendo fuori varie utilities. Quasi contemporaneamente si verificava una esplosione in un ufficio situato a varie decine di metri dal punto di perdita, che distruggeva parte del fabbricato uffici e servizi.

A seguito del flash-fire, la pozza formatasi sotto alla parte posteriore dell'autocisterna ed il flusso di propano che continuava a fuoriuscire si incendiavano, generando un incendio le cui fiamme avvolgevano o lambivano la parte posteriore della cisterna.

L'azione congiunta di aumento di pressione interna e di decadimento delle caratteristiche di resistenza del materiale del mantello della cisterna, dopo alcuni minuti dall'innesco dell'incendio provocavano il cedimento per sovrappressione del mantello (la lamiera si squarciava) lasciando sfogo alla sovrappressione accumulata all'interno della cisterna attraverso lo sfiato di una parte del gas, con formazione di un fenomeno simile al fire-ball, seguito poi dall'incendio dei gas che continuavano a defluire dallo squarcio della cisterna, con caratteristiche simili ad una torcia.

Un ulteriore effetto del flash fire iniziale fu probabilmente quello di danneggiare anche le connessioni del braccio di carico collegato ad un'altra autocisterna situata vicino alla prima, di capacità 15 m³, che era riempita intorno al 10% del suo volume. Lo scoppio ed il successivo incendio tipo torcia contribuirono ad aggravare il danno, con formazione di perdita ed innesco di fiamma, così da portare ad un degrado delle caratteristiche di resistenza del materiale che causò, dopo qualche tempo, il distacco del braccio e la formazione di un jet-fire che coinvolgeva la cisterna stessa.

Verso le 8:40 l'involucro della seconda cisterna, riscaldato dal jet-fire, cedeva con formazione di BLEVE che distruggeva completamente il recipiente e di un fire-ball. Pochi minuti dopo, alcuni pozzetti di fognatura (tombini) situati nella zona delle pensiline di carico, a seguito di sovrappressione nella rete fognaria, si scopperchiavano.

L'intervento massiccio dei VVF riusciva intanto a mettere sotto controllo i focolai ed a delimitare la zona interessata da incendio, intercettando le tubazioni ed apprestando protezioni per le altre strutture ed apparecchi ed iniziando l'opera di verifica dei danni. L'incendio della prima cisterna, costituito dall'efflusso di vapori attraverso lo squarcio prodotto dallo scoppio, veniva lasciato bruciare sotto controllo per consumare tutto il GPL.

Gli ultimi focolai venivano spenti verso le 17 per esaurimento del combustibile contenuto nell'autocisterna sede dell'evento iniziatore.

3. CRITERI ADOTTATI PER LA RICOSTRUZIONE E LO STUDIO DEGLI EVENTI

Preliminarmente si è cercato di comprendere qualitativamente la dinamica degli eventi al fine di individuare le variabili e parametri che possono descrivere lo scenario dei fatti accaduti; in un secondo momento si sono applicati i modelli di calcolo e le teorie scientifiche per simulare i fenomeni ed ottenere le informazioni numeriche sugli eventi.

Nel caso di un incidente del tipo di quello oggetto del presente studio, dove si sono verificati molteplici fenomeni di non semplice ricostruzione c'è sempre una difficoltà di adattare la dinamica dei fatti al fine di poter effettuare la modellizzazione matematica. Nella fattispecie si sono analizzati singolarmente gli eventi, ricomponendo le varie sequenze alla fine, in modo da poter avere una visione globale di quanto accaduto.

Il lavoro è stato condotto esaminando le testimonianze e studiando i vari fenomeni secondo la seguente articolazione:

3.1 esame preliminare dei riscontri e definizione delle fasi dell'evento

3.2 analisi del cedimento strutturale della cisterna origine dell'evento, mediante studio del comportamento del materiale soggetto al fuoco e simulazione delle tensioni indotte,

3.3 esame e ricostruzione dei vari fenomeni mediante applicazione di modelli di simulazione degli effetti di incidente.

3.1 Esame preliminare e definizione fasi dell'evento

L'esame preliminare, finalizzato a definire qualitativamente l'entità e la tipologia dei fenomeni e dei danni per individuare le variabili o parametri di sorgente dai quali iniziale la modellizzazione, si è basato ovviamente sui riscontri eseguiti a posteriori, quindi su osservazioni e deduzioni che non sempre erano finalizzate alla ricostruzione dell'evento mediante modelli, anche perché nei momenti critici di un incidente e nelle fasi immediatamente successive vi sono altre esigenze ed altri problemi da risolvere.

Le condizioni ed aspetti che risultano importanti per il presente lavoro vengono esaminate ed esposte seguendo l'ordine cronologico dei fatti.

A. Fuoriuscita iniziale

La fuoriuscita iniziale appare essere stata caratterizzata da un flusso bifase in ambiente semiconfinato: la posizione del punto di efflusso, all'interno del cassonetto di contenimento delle valvole posto sulla parte retrostante dell'autocisterna, ha comportato presumibilmente uno sfrangiamento del getto, con accumulo di una parte del propano all'interno del cassonetto, sottoraffreddamento del gas a causa della laminazione e del flash isoentalpico e gocciolamento o sversamento sull'asfalto di una frazione di liquido. Ai fini della simulazione con modelli ciò si traduce in uno scenario atipico, in quanto non rientrante nelle comuni opzioni di modellizzazione che prevedono il jet bifase libero o il flusso monofase.

B. Dispersione del gas nell'atmosfera

Le condizioni atmosferiche del sito, riferite alla fase iniziale degli eventi, sono state ricavate dalle registrazioni di due stazioni meteo situate a pochi km dal luogo dell'incidente e vengono sintetizzate dai seguenti dati

	stazione 1	stazione 2
velocità del vento	0,5 m/s	0,5 m/s
temperatura	5°C	6°C
direzione vento	100°	250°
umidità relativa	80%	85%

La bassa velocità del vento rilevata, peraltro riferita presumibilmente alla quota standard di 10 m, quindi ancora minore se riportata alla quota del suolo, introduce subito un nuovo problema, connesso con i limiti intrinseci della maggior parte dei modelli di simulazione della dispersione.

Escludendo dal possibile utilizzo i modelli di tipo gaussiano, per la cui applicazione si raccomandano valori di velocità del vento non inferiori a 2 m/s con limite assoluto ad 1 m/s, anche per i modelli che contengono un trattamento più "fisico" del fenomeno, conosciuti in gergo come modelli gravitazionali, o di dispersione passiva, sono in genere raccomandate velocità minime di 1 m/s.

Ciò trova supporto anche nel fatto che la quasi totalità delle sperimentazioni effettuate per la validazione dei modelli stessi sono state svolte con velocità del vento maggiore di 1 m/s.

Anche l'utilizzo di particolari e sofisticati programmi di calcolo non fornirebbe pertanto maggiore affidabilità nei risultati.

L'applicazione dei modelli trova poi un'ulteriore difficoltà nella definizione della classe di stabilità cui riferirsi, dato che le osservazioni delle due stazioni non sono omogenee, probabilmente per il diverso utilizzo che viene fatto dei dati rilevati: una stazione registrava cielo coperto da 5/8 a 7/8 con base nubi a 4000 piedi (ca 1200 m), mentre la seconda rilevava una leggera copertura (<4/8) con base nubi a 3000 piedi e copertura da 5/8 a 7/8 con base nubi a 8000 piedi (2500 m circa). Mancando altre indicazioni, ai fini dell'applicazione dei modelli di simulazione si deve utilizzare un approccio teorico semplificato, tipo quello proposto da Pasquill [1] che è forse il più conosciuto. Ciò comporta però notevoli approssimazioni, sia perché tali schemi si basano su statistiche ricavate da osservazioni negli USA o in Gran Bretagna e finalizzate all'applicazione di modelli per le ricadute da camini, sia perché nel periodo del primo mattino e della sera, in concomitanza con il sorgere ed il tramontare del sole, in molte zone si hanno situazioni diverse da quelle che si ottengono con questi schemi.

Basandosi sul grado di copertura del cielo (da 4/8 a 7/8) associato alla velocità del vento, secondo lo schema di Pasquill si avrebbe un classe di stabilità B. Riferendosi invece alla deviazione standard della direzione del vento (NRC) [2] e considerando che alla bassa velocità del vento (ca 0,2 m/s alla quota di due metri) consegue una pressoché nulla variazione della direzione, si avrebbe una classe di stabilità F.

C. Flash fire ed incendio

La ricostruzione di questa fase non viene approfondita, sia in quanto i riscontri del flash fire iniziale risultano di difficile individuazione, considerando che vi sono stati poi altri eventi che possono aver influito sulle osservazioni finali (per esempio l'irraggiamento da fire ball può aver determinato effetti sulla vegetazione o sui materiali che visivamente possono apparire simili a quelli del flash fire), sia perché sono stati privilegiati gli altri fenomeni.

D. Cedimento della 1ª cisterna

Pochi minuti dopo che si era verificato il flash fire si è avuto lo scoppio con formazione di uno squarcio nel mantello della prima cisterna. Le cause di questo evento sono state analizzate considerando che la parte posteriore della cisterna era interessata da un incendio che si potrebbe definire di tipo misto: pool fire e jet fire. Infatti, la frazione di GPL non vaporizzata che aveva formato la pozza sul piazzale contribuiva per una parte a generare fiamme che possono essere simulate mediante un modello pool fire, ma siccome l'efflusso del GPL dalla zona valvole ancora non era cessato, anche la frazione di gas che continuava a fuoriuscire contribuiva all'incendio, generando fiamme pulsanti che venivano influenzate dal pool fire sottostante ed andavano a lambire la parte retrostante della cisterna.

L'effetto di pulsazione, tipico di questi fenomeni, non viene in genere rappresentato dalla maggior parte dei modelli, che considerano una combustione stazionaria con un'emissione media di calore suddivisa tra irraggiamento, convezione e conduzione. Normalmente i modelli di simulazione sono concepiti per fornire indicazioni sull'irraggiamento, mentre nel caso in questione le fiamme lambivano direttamente la superficie della cisterna, probabilmente inducendo sollecitazioni anche per effetto della turbolenza stessa della fiamma.

Considerando la comune suddivisione fatta per le simulazioni, basata sull'assunzione che un 30% del calore sviluppato si propaga per irraggiamento, il calore messo in gioco dalla combustione può essere stimato in un massimo del 70% del calore di combustione del GPL.

In merito al cedimento del materiale della cisterna sono da rilevare alcuni riscontri eseguiti a posteriori: in primo luogo lambita dalle fiamme, che è stata stimata pari a circa $\frac{1}{3}$ della superficie totale ed è caratterizzata da evidenze di surriscaldamento, a differenza delle zone interessate da solo irraggiamento che presentano segni più superficiali. In secondo luogo la forma irregolare dello squarcio creato dallo scoppio, che è risultata di dimensioni circa 40x60 mm e situata nella zona di congiunzione tra il fondo emisferico ed il fasciame cilindrico.

Tale dimensione, peraltro, risulta importante per l'analisi del fenomeno dello sfogo di gas incendiato, che anche da questi riscontri non si può configurare come un classico fire ball, del tipo di quelli connessi a BLEVE, i quali si generano da squarci di dimensioni maggiori o dal collasso pressoché totale del recipiente.

E. Effetti degli incendi e BLEVE della 2ª cisterna

Una conseguenza del flash fire e dell'incendio susseguente è stato anche il danneggiamento delle connessioni e del braccio di travaso collegato alla seconda autocisterna situata vicino alla prima, ad una distanza di 8-10 m. Non è stato possibile accertare se il danneggiamento sia stato anche conseguenza di eventuali lievi sovrapressioni, che possono generarsi nell'ambito di un flash fire a causa di accelerazioni locali della fiamma, comunque è verosimile che si sia verificato un trafilamento iniziale che, innescato dalle fiamme vicine, ha portato ad un degrado del materiale di guarnizioni e componenti, fino al cedimento della connessione del braccio di travaso ed al successivo incendio del gas che fuoriusciva, con fiamme che avvolgevano direttamente la cisterna.

Dalle testimonianze, il fenomeno che ne è conseguito risulta collocarsi nella tipologia del BLEVE con fire ball; l'entità non eccessiva delle conseguenze può essere connessa alla limitata quantità di GPL presente nella cisterna (ca 1,5 m³).

F. Incendio controllato e rilievi conclusivi

La combustione controllata della prima cisterna è durata circa 8 ore, ma per assicurare l'alimentazione delle fiamme ed evitare lo spegnimento per il rientro della fiamma nella cisterna, si è dovuto riscaldare il mantello della cisterna mediante getti d'acqua (il propano ancora presente nella cisterna tendeva a sottoraffreddarsi a causa dell'evaporazione, con riduzione del flusso di vapori a causa della mancanza di ebollizione). Sulla base di questa durata e del rateo di evaporazione calcolato per il propano all'interno della cisterna si è stimata la quantità di gas presente dopo il cedimento e sfogo dei vapori.

Sulla base di questi riscontri e delle considerazioni sopra esposte sono stati elaborati i calcoli e le simulazioni per ricostruire gli eventi, valutandone la congruenza con quanto osservato e con le esperienze registrate in analoghe circostanze.

3.2 Analisi del cedimento strutturale della cisterna

In primo luogo si è analizzato il fenomeno del cedimento strutturale della cisterna sulla quale si è verificato l'iniziale rilascio di propano, che costituisce anche uno degli eventi principali in quanto ha determinato effetti diretti su una cisterna adiacente.

Pur essendo disponibili vari modelli, anche sofisticati, per lo studio di eventi simili, la peculiarità dell'accaduto, che si sostanzia in una rottura parziale del recipiente e non nel classico fenomeno del BLEVE con distruzione totale, ha richiesto la creazione di un modello matematico per poter eseguire un'analisi termomeccanica di un serbatoio mobile esposto ad incendio e contenente un fluido bifasico infiammabile in pressione. Ciò al fine di stabilire le condizioni dell'autocisterna durante l'incidente e comprendere le modalità del cedimento strutturale della stessa.

L'analisi termomeccanica è stata eseguita con l'ausilio di un codice di calcolo agli elementi finiti, più precisamente ANSYS5.3, che permette lo studio delle tensioni e deformazioni delle strutture a seguito dell'applicazione di sollecitazioni meccaniche e termiche, anche variabili nel tempo. Non si tratta cioè di un modello per la simulazione di fenomeni incidentali tipo BLEVE o scoppio di recipienti, ma di un codice di calcolo ingegneristico finalizzato allo studio del comportamento dei materiali in funzione di particolari sollecitazioni.

Questo programma, mediante tecniche numeriche sofisticate, consente la soluzione di problemi di tipo termico e/o strutturale a partire da variabili input riguardanti le caratteristiche geometriche, fisiche, meccaniche della struttura che si vuole analizzare. I risultati che esso mette a disposizione sono in formato sia grafico che numerico.

La maggiore difficoltà riscontrata in questa fase di analisi è stata quella di determinare l'ottimale intervallo di integrazione in funzione delle molteplici variabili inserite, al fine di individuare con sufficiente precisione ed attendibilità le varie fasi del fenomeno di indebolimento del materiale, fino al punto di cedimento che si richiedeva fosse indicato sia sotto il profilo geometrico (zona di collasso), sia per quanto riguarda le condizioni all'interno del recipiente. Il lavoro si è articolato in varie fasi, consistenti nel creare il modello geometrico, nell'implementare le dimensioni e le caratteristiche fisico-meccaniche dell'acciaio, nel calcolare il carico termico da far applicare al modello, nella valutazione delle variazioni dei parametri termodinamici del GPL in funzione della temperatura, nell'elaborazione dei dati in funzione della pressione all'interno del recipiente.

Dato lo spessore della parete del serbatoio (circa 1 cm), piuttosto elevato rispetto al suo diametro, non è stato possibile applicare le semplificazioni della teoria della meccanica dei recipienti in pressione, con la conseguenza di dover appesantire notevolmente la soluzione del problema e complicare anche la fase di introduzione dei dati (si è usata la teoria della meccanica dei serbatoi in pressione in parete spessa)

Il modello della struttura viene illustrato nel grafico della Figura 1 seguente.

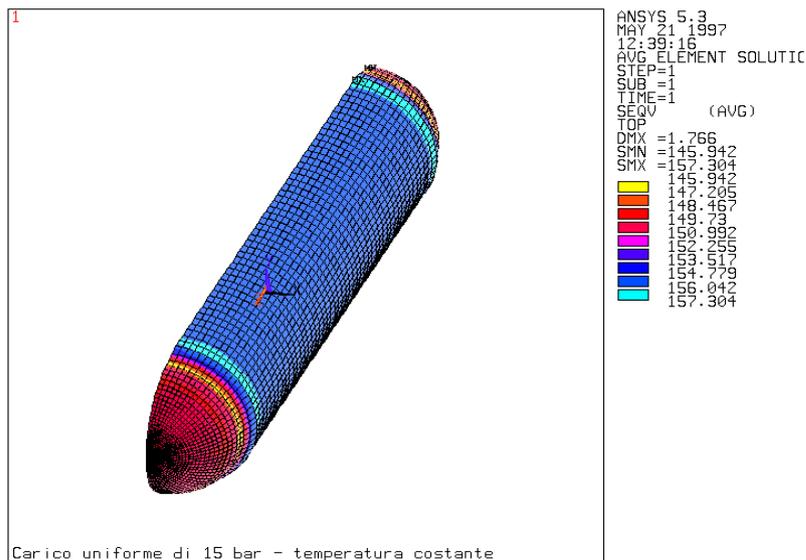


Figura 1

Dopo aver definito la geometria del recipiente, le caratteristiche fisiche e di resistenza meccanica, si è passati a definire i carichi, o meglio, le sollecitazioni agenti.

L'incendio che ha avvolto la parte posteriore dell'autocisterna è stato simulato con un flusso termico variabile nel tempo la cui intensità è stata stimata considerando che tutto il gas che fuoriusciva partecipasse alla combustione. Infatti, dopo l'innesco ed il flash fire iniziale, l'efflusso di GPL dalla perdita non si era interrotto ed il gas che fuoriusciva formava una fiamma che, data la posizione del punto di efflusso all'interno del cassonetto delle valvole, assumeva una forma irregolare a causa degli ostacoli alla libera propagazione del jet fire. È anche verosimile che non tutto il gas bruciasse, lasciando una frazione di incombusti proprio a causa di queste ostruzioni che comportavano inoltre un continuo pulsare e variare della geometria di fiamma.

Il carico termico che ne è derivato è stato applicato alla porzione di superficie che a posteriori è risultata essere stata avvolta dalle fiamme del pool-fire e la sua variazione temporale corrisponde a quella della "Curva di incendio dei GPL" facente parte dell'Eurocodice1, cioè della norma UNI ENV 1991-2-2 che si riporta di seguito in Figura 2.

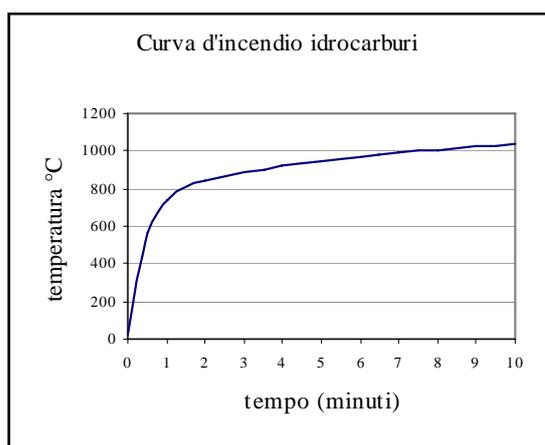


Figura 2

Per determinare le sollecitazioni indotte nel materiale dalla pressione interna si è considerata la differente capacità termica della fase liquida e della fase vapore del propano, dato che i coefficienti di scambio termico per la fase liquida sono di un ordine di grandezza superiori rispetto a quelli della fase gassosa. In un recipiente avvolto dalle fiamme, quindi, la parete metallica sarà quindi "raffreddata" nella parte a contatto con la fase liquida, mentre nella parte a contatto con la fase gassosa si avranno le condizioni più gravose, specie per i punti direttamente a contatto con la fiamma. Qui in genere si verifica il cedimento strutturale e conseguentemente la rottura del mantello della cisterna, poiché la lamiera viene sensibilmente indebolita dalle elevate temperature indotte e dall'incremento di pressione connesso

con il riscaldamento del contenuto. Il calcolo è stato quindi sviluppato considerando la degradazione delle caratteristiche di resistenza del materiale in funzione del carico termico applicato, l'andamento delle sollecitazioni dovute all'aumento della pressione interna e le tensioni derivanti dalla geometria e dalla consistenza del materiale.

Pur ipotizzando, per esigenza di semplificare il calcolo, un comportamento isotropo del materiale si rilevano infatti due aspetti connessi con le modalità e criteri di realizzazione di questi recipienti cilindrici.

Basandosi sul fatto che la forma sferica comporta maggior resistenza rispetto a quella cilindrica si usa normalmente adottare uno spessore inferiore per i fondi emisferici rispetto al fasciame cilindrico, raccordando i due lembi mediante saldatura. Nella situazione di stress generatasi a seguito dell'incendio si inducono deformazioni diverse in queste due parti; semplificando, si può dire che mentre nel fasciame vi sono tensioni triassiali (radiali, longitudinali e tangenziali), per la parte emisferica le tensioni saranno su due assi (radiale e tangenziale).

Ciò comporta la nascita di uno stato tensionale localizzato all'interfaccia cilindro-sfera, dovuto al fatto che il primo tende ad "aprirsi" maggiormente rispetto alla seconda, quindi si troverà "bloccato" nella sua deformazione. La sfera eserciterà sul cilindro un momento ed uno sforzo di taglio (e viceversa il cilindro li eserciterà sulla sfera) che indurranno tensioni ulteriori, che andranno a sommarsi a quelle che "normalmente" agirebbero sul serbatoio soggetto ad una pressione interna.

Semplificando, il risultato di questi fenomeni può essere illustrato nella Figura 3 sotto riportata.

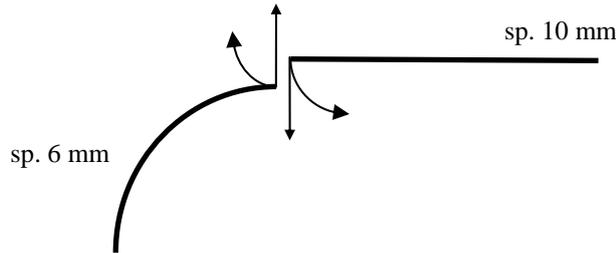


Figura 3

Pur nell'approssimazione intrinseca alle ipotesi semplificative effettuate e nella incertezza data dalla molteplicità di variabili in gioco, tali considerazioni appaiono tener conto degli aspetti più significativi che possono contribuire all'indebolimento ed al cedimento del recipiente.

L'applicazione del programma, che è così risultata anche una verifica a questa spiegazione, ha permesso di individuare la distribuzione del campo di temperatura al momento del cedimento, ottenendo l'andamento delle tensioni sulla struttura dovute alla presenza contemporanea del campo termico e della spinta uniforme all'interno del serbatoio provocata dal fluido pressurizzato, quindi l'indicazione delle deformazioni in campo plastico indotte dallo stato tensionale agente.

Tramite quest'ultima grandezza è possibile identificare il punto di cedimento della struttura, come è possibile vedere dai risultati dell'applicazione presentati graficamente nelle seguenti Figure 4 e 5.

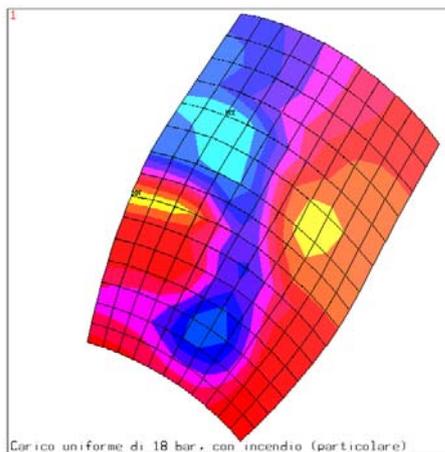


Fig. 4

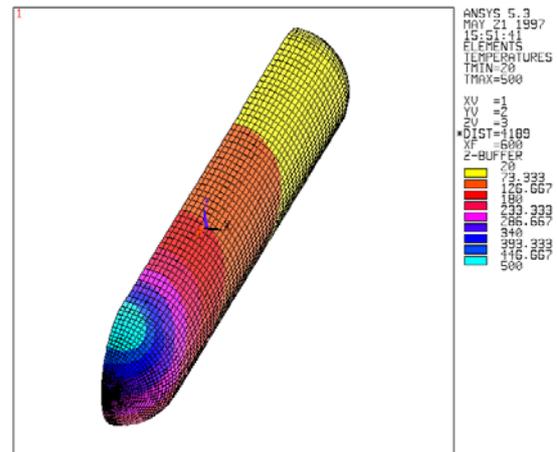


Fig. 5

I risultati che si sono ottenuti concordano con le testimonianze di chi ha assistito all'incidente (dal punto di vista delle sequenze cronologiche dei fatti) e dall'evidenza del serbatoio (che è rimasto intatto). Inoltre è in buon accordo con i risultati delle prove sperimentali condotte da vari enti di ricerca al fine di poter quantificare le grandezze caratteristiche delle sollecitazioni strutturali agenti sui serbatoi in pressione contenenti GPL in casi analoghi a quello dell'incidente in oggetto.

3.3 Esame e ricostruzione degli eventi mediante modelli di simulazione

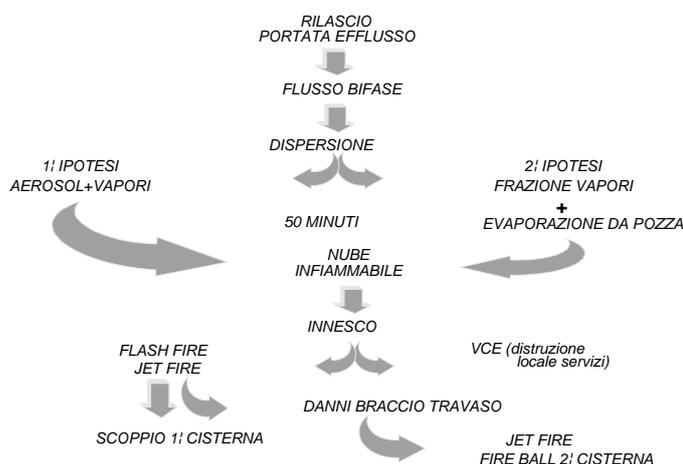
I modelli utilizzati per effettuare le simulazioni, scelti tra quelli disponibili, sono stati:

- ↳ ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation - Federal Emergency Management Agency, U.S. DOT, U.S.EPA) che è un insieme di programmi di calcolo concepito per la simulazione di incidenti ai fini dell'applicazione del piano di emergenza.
- ↳ DEGADIS 2.1 (DEnse GAs DISpersion - U.S. Coast Guard, G.R.I. & A.P.I. - US E.P.A.) utilizzato solo per la simulazione della dispersione di gas pesanti.
- ↳ HGSYSTEM 3.0, sviluppato dalla Shell e distribuito da A.P.I. (Pubbl. 4636 - 1995), che è articolato in vari moduli collegati tra loro mediante una routine interattiva di input/output.
- ↳ SIGEM-SIMMA in dotazione al Corpo nazionale VVF, sviluppato da TEMA S.p.A. e concepito con finalità identiche o similari al ARCHIE.
- ↳ STAR 3 (Safety Techniques for Assessment of Risk) sviluppato da ARTES e composto di svariati modelli per la simulazione di scenari tipici per l'analisi di rischio.

I punti o fattori di riferimento per lo studio dei vari fenomeni, ricavati dalle testimonianze, possono essere così sintetizzati:

- il rilascio iniziale di GPL, prima dell'innescò, è perdurato per tempi dell'ordine di 40-50 minuti,
- l'innescò ha generato un flash fire, ma anche danni da sovrappressione che hanno pressoché distrutto un locale in muratura leggera con indicazioni che fanno pensare ad una sovrappressione sviluppatasi all'interno del locale stesso,
- a seguito del flash fire si è determinato un incendio localizzato nella parte posteriore della cisterna, con caratteristiche miste di pool fire e jet fire (parte del GPL rimaneva come residuo liquido a terra e parte continuava a fuoriuscire dalla rottura iniziale) e con fiamme che lambivano la parte posteriore della cisterna,
- l'incendio ha causato il cedimento del mantello della cisterna con fuoriuscita di parte del contenuto e formazione di un fenomeno intermedio tra il fire ball ed il jet fire,
- il flash fire ed il successivo incendio sulla prima cisterna comportavano anche danni alle connessioni di travaso su un'autocisterna adiacente, con degrado dei materiali, distacco del braccio di travaso, ulteriore fuoriuscita di GPL che si è subito incendiato, riscaldando anche questa seconda cisterna piena per ca il 10% del contenuto,
- dopo qualche decina di minuti anche il materiale della seconda cisterna cede e si verifica un BLEVE con fire ball.

Lo schema di lavoro seguito è delineato dal seguente grafico.



Gli ulteriori eventi, pur comportando ancora danni ed interventi al fine di ricondurre la situazione alla normalità e perdurando ancora per varie ore, non vengono esaminati nel presente studio.

Nella ricostruzione di eventi incidentali si segue in genere il criterio di esaminare tutti gli aspetti e le possibilità, escludendo poi quelle che sulla base di riscontri il più possibile oggettivi appaiono tecnicamente o scientificamente non realistiche. La conclusione è quasi sempre quella di accettare l'ipotesi più probabile alla luce delle testimonianze e dei riscontri o prove sperimentali.

Seguendo la sequenza illustrata nello schema si espongono di seguito i risultati delle simulazioni e le considerazioni che ne scaturiscono.

La portata di efflusso è stata determinata tenendo conto della presenza di un tratto di tubo pescante di ca 1 m di lunghezza tra il foro e l'interno della cisterna, assumendo un orifizio con diametro equivalente di 25 mm, temperatura del GPL di 278 K e pressione di equilibrio (5,4 bar a). I risultati delle valutazioni sono riportati nella tabella seguente.

modello	portata (kg/s)	regime flusso
ARCHIE	11,6 (portata di picco)	bifase
Sigem Simma	0,46	gas
STAR	2,25	bifase

Dato che l'efflusso, pur se con regime non stazionario dovuto alla probabile formazione di ghiaccio che ostruiva in parte il foro, è perdurato per almeno 50 minuti con svuotamento di circa un terzo del contenuto della cisterna, l'unico risultato congruente è quello riferito alla portata di 2,25 kg/s, sulla base del quale la quantità fuoriuscita in ca 50 minuti assomma a 6,75 t, cioè poco meno di un terzo del contenuto della cisterna che, dalle testimonianze, era piena per l'80% del volume, quindi con circa 21,4 t.

Per questo dato la frazione di GPL che vaporizzava per flash si ricava sommando la parte evaporata all'interno del tratto di tubo a quella relativa al flash isoentalpico, risultando poco più del 23% della portata.

Nell'analisi di rischio, per determinare la portata globale di vapori che si disperde in atmosfera si seguono in genere due criteri: il primo considera che a questa parte di vapori si aggiunga una frazione di aerosol equivalente. Il secondo consiste nella somma della frazione di vapori alla portata evaporante dalla pozza.

Nel caso in oggetto, il primo criterio porta ad un totale del 46,5% della portata (1,046 kg/s), il secondo, calcolato applicando il modello di evaporazione da pozza contenuto nel sistema STAR (nessuno degli altri modelli consente questa simulazione nelle condizioni ipotizzate, assumendo sempre che l'efflusso sia una miscela di gas ed aerosol che non forma pozza) ed ipotizzando vari diametri di pozza con forma pressoché circolare. Si ricava l'indicazione che la dimensione massima della pozza poteva essere intorno a 15 m², in quanto con questa area si ha un equilibrio tra la portata di efflusso e quella di evaporazione, cioè la portata totale di vapori risulta pari a quella di efflusso.

Per la valutazione delle concentrazioni in aria si sono utilizzati vari modelli, ognuno associato alla relativa portata di efflusso; le condizioni atmosferiche adottate, che purtroppo sono al limite dell'accettabilità per l'applicazione della più parte dei modelli, sono: stabilità F e vento 0,51 m/s. I risultati sono esposti nella seguente tabella.

modello	portata vapori	LFL	50% LFL	infiammabile
ARCHIE	picco 11,6 kg/s	140 m	203 m	1800 kg
Degadis	2,25 kg/s	160 m	205 m	1030 kg
HGSystem	2,25 kg/s	33 m	55 m	n.c.
Sigem-Simma	0,46 kg/s (fase gas)	n.r.	n.r.	n.c.
STAR	1,046 kg/s	24 m	35 m	46 kg
"	2,25 kg/s	38 m	55 m	157 kg

n.c = non calcolato. n.r. = valore non raggiunto.

I dati riportati nella tabella meritano alcuni commenti, se non altro perché vi sono differenze eclatanti tra i risultati forniti dai vari modelli. Per quanto concerne il modello ARCHIE appare evidente che il valore della portata di vapori adottato per la dispersione è inferiore a quello di picco fornito nei risultati, tuttavia tale dato non viene fornito.

I risultati di Degadis, che appaiono in sintonia con ARCHIE sono influenzati però dal limite connesso alla velocità del vento, per la quale viene indicato un minimo di 1 m/s. Analogo limite viene posto anche per HGSystem (minimo 1,5 m/s), tuttavia il risultato è notevolmente diverso da quello del modello precedente.

Sigem Simma appare sprovvisto di una routine di calcolo per dispersione di vapori pesanti ed aerosol ed anche la valutazione della portata risulta riferita alla sola fase gas.

Dai risultati forniti, appare non congruente con i riscontri l'opzione di considerare solo la frazione di flash più un'analogo quantità di aerosol, mentre può essere più pertinente considerare l'intera portata di efflusso in caso di flusso bifase.

In definitiva, dai riscontri e testimonianze la nube di gas infiammabile appare aver interessato una zona estesa per un centinaio di metri, ma con propagazione non uniforme, bensì secondo due direttrici che hanno portato il gas in due punti differenti del sito.

Anche l'applicazione di modelli che tengono conto della presenza di ostacoli o fabbricati sulla direttrice di propagazione del gas (STAR) fornisce solo l'indicazione di un accumulo nella zona antistante il fabbricato, senza modificare sostanzialmente le distanze a cui si situano i limiti di infiammabilità.

Trascurando la simulazione del flash fire iniziale, si sono analizzati il fenomeno dell'irraggiamento fornito dallo sfogo di gas incendiati connesso con lo scoppio del primo recipiente ed i casi di fire ball e BLEVE relativi alla seconda cisterna.

Il fenomeno che ha interessato la prima cisterna in concomitanza con lo scoppio o cedimento strutturale può essere fatto rientrare nel quadro dei "transient jet release" [3] che si verificano quando le condizioni della sostanza nel recipiente non sono di surriscaldamento [4]. In genere ciò accade quando il degrado del materiale del recipiente non è totale, ma limitato ad una piccola zona, o anche quando le caratteristiche di resistenza del materiale sono ancora buone, ma si ha uno sfogo da una piccola apertura (cricca, rottura tronchetto, ecc.). In questo caso la rottura non si propaga velocemente o non coinvolge l'intero recipiente e la sovrappressione viene sfogata dall'apertura creatasi con caratteristiche più simili ad un jet che ad un fire ball, pur se limitate nel tempo a pochi secondi.

Dalle correlazioni ricavate da varie fonti [3, 5] il tempo richiesto per il collasso di un recipiente simile alla cisterna in questione varia in funzione della geometria e tipo di fiamma che lambisce il materiale: in accordo con le conclusioni del modello esposto al capitolo 3.2, per fiamme turbolente sulla sommità del recipiente si stimano tempi dell'ordine di 7 minuti, mentre per fiamme da pool fire i tempi sono dell'ordine di 15 minuti. L'effetto meccanico di erosione operato dalla turbolenza della fiamma, oltre a ridurre ancora questi tempi, può causare l'indebolimento di zone limitate del mantello con apertura di uno sfogo dal quale fuoriescono i gas incendiandosi.

Dai rilievi eseguiti l'apertura sulla prima cisterna è stata stimata di dimensioni pari ad un foro di diametro equivalente 50 cm; sulla base di questa indicazione si è adottato il seguente criterio per stimare gli effetti del fenomeno:

- a) simulazione di un jet fire con portata pari a quella iniziale fuoriuscente dal foro, con pressione 17 bar e temperatura 323K,
- b) stima della durata del jet fire mediante valutazione della quantità di gas sfiatato nel transitorio necessario a ricondurre la pressione all'interno del serbatoio intorno all'atmosfera,
- c) valutazione della dose di energia irraggiata.

La portata di efflusso iniziale dei vapori dal foro è stata calcolata con due modelli, fornendo indicazioni pressoché equivalenti (503 kg/s forniti da Sigem-Simma, 523 kg/s per STAR). La stima della durata dello sfiato è stata eseguita sia sulla base dell'indicazione del modello STAR (3 secondi circa), sia valutando la massa che doveva essere sfiata per ricondurre la pressione al valore atmosferico all'interno della cisterna, partendo dai 17 bar dello scoppio.

Considerando il volume di GPL fuoriuscito (ca 13 m³) e la capacità della cisterna (52 m³) che inizialmente era riempita per l'80% del volume, la parte occupata dai vapori al momento dello scoppio era di ca 28 m³ che con una pressione di 17 bar sono equivalenti a 456 m³ di gas, pari a ca 12700 kg (la densità del gas a 17 bar è ca 27,9 kg/m³). Con una portata intorno a 520 kg/s occorrono ca 24 secondi per sfiatare questa massa di gas lasciando nella cisterna una pressione poco più che atmosferica.

Le indicazioni fornite dai modelli di jet fire sono state quindi elaborate per tener conto della limitata durata nel tempo del fenomeno trasformando l'irraggiamento in energia (dose=kW/m²*tempo) come riportato di seguito.

modello	350 kJ/m ²	250 kJ/m ²	125 kJ/m ²
ARCHIE	49 m	-	106 m
Sigem Simma	n.r.	n.r.	n.r.
STAR	n.r.	n.r.	110 m

Dai riscontri emersi questi risultati appaiono cautelativi per eccesso, in quanto a distanze inferiori ai 100 m erano presenti persone che non hanno riportato danni o lesioni. È anche evidente, però, che nella valutazione si sono effettuate delle notevoli semplificazioni, soprattutto nel non tener conto del decrescere della portata e della densità del gas in funzione dell'abbassamento di pressione: un affinamento del calcolo potrebbe portare a risultati più vicini ai riscontri.

Il fenomeno che ha interessato la seconda cisterna appare più attinente alla teoria del BLEVE, anche perché ha comportato il collasso totale del recipiente con proiezione di frammenti, alcuni dei quali, di dimensioni notevoli, sono stati ritrovati a ca 500 m dal punto di origine.

La quantità di gas contenuta, secondo le testimonianze, ammontava a circa il 10% del volume della cisterna (15 m³), quindi si trattava di circa 800 kg di GPL.

Applicando i modelli di simulazione a questa quantità e considerando condizioni di collasso analoghe alla prima cisterna (17 bar e 323K) si ottengono i seguenti risultati.

modello	raggio	350 kJ/m ²	250 kJ/m ²	125 kJ/m ²
ARCHIE	29 m	29 m	-	67 m
Sigem Simma	21 m	< 10 m	< 10 m	40 m
STAR	25,5 m	10 m	30 m	70 m

In questo caso le indicazioni fornite dai modelli sono più omogenee, tuttavia risultano ancora cautelative per eccesso rispetto a quanto rilevato, anche se la mancanza di lesioni è forse da riferire anche alla prudenza dei presenti, i quali potrebbero aver rilevato per tempo l'approssimarsi del fenomeno ed aver provveduto a ripararsi. Il risultato fornito dai modelli viene illustrato nel grafico di Figura 6 riportato di seguito assieme ad una comparazione teorica eseguita per studiare più accuratamente la risposta dei modelli e nella quale si è anche inserito il metodo semplificato del D.M.A. 15/5/96 (Figura 7).

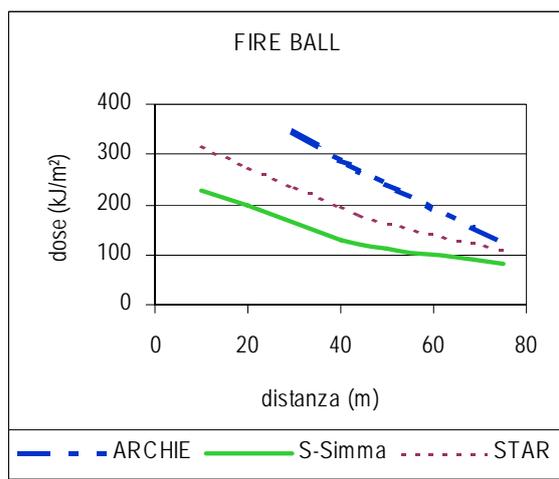


Fig. 6

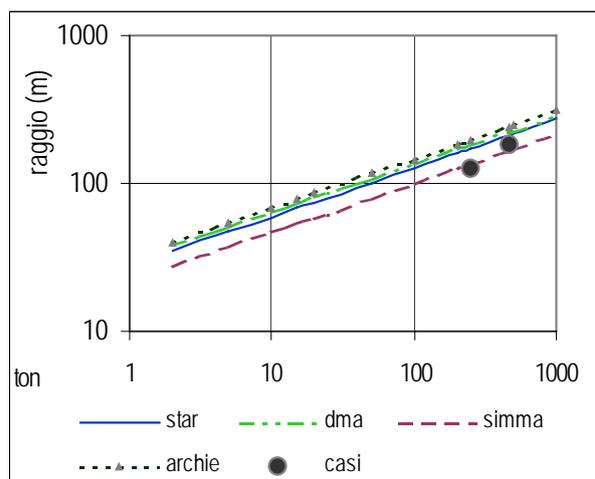


Fig. 7

Va rilevato che mentre per piccole quantità in gioco i modelli forniscono in genere previsioni molto cautelative e spesso non in linea con i riscontri, quando si passa a simulare fenomeni di grande magnitudo l'approssimazione appare minore. Ciò viene evidenziato anche dalla Figura 7, dove sono riportate le osservazioni riferite a due casi eclatanti. Il primo, di maggiore magnitudo, è uno dei BLEVE verificatisi a S.Juan Ixhuatepec (Mexico City) nel 1984 (serbatoio sferico da 1600 m³ con ca. 470 t di GPL), il secondo si riferisce all'incidente accaduto nel 1985 a Priolo - Siracusa (BLEVE di un serbatoio da 500 m³ di propilene con quasi 250 t di prodotto). Per entrambi i casi le curve fornite dai modelli risultano in buona approssimazione.

Si è esaminato infine il fenomeno della proiezione di frammenti, riferendosi a due parti della seconda cisterna che sono state ritrovate ad una certa distanza dal luogo dello scoppio.

Si tratta di due pezzi di dimensioni non trascurabili che sono stati rinvenuti a circa 500 m: il primo era costituito da una parte del mantello (lamiera di dimensioni intorno a 1,2x1,2 m con spessore 10 mm), mentre il secondo era un tratto di tubazione, probabilmente il pescante interno della cisterna di lunghezza circa 1 m e DN80.

La simulazione del fenomeno di proiezione frammenti presenta ancora notevoli incertezze, dovute alla forma dei pezzi e, soprattutto, all'angolo di attacco (angolo di partenza) del frammento che può solo essere stimato sulla base delle osservazioni a posteriori o ipotizzando le condizioni più critiche.

Fatta eccezione per i modelli STAR, basati su teorie tratte da pubblicazioni NASA, risulta non possibile considerare appropriatamente la forma e le dimensioni del frammento, quindi i risultati ottenuti da altri modelli appaiono molto approssimativi. Infatti, mentre il dato fornito dal modello Sigem Simma si riferisce ad un range compreso tra 314 e 1800 m, impostando l'angolo di attacco del frammento a 35° i risultati ottenuti con STAR sono di ca 670 m per il primo frammento e di 520 m circa per il secondo. Va rilevato, comunque, che variando l'angolo di attacco del frammento si ha un'escursione del campo di distanze che raggiunge anche il 100%.

Applicando il modello semplificato di Birk [6] la distanza che può essere raggiunta da un frammento di dimensioni e massa significative per un serbatoio da 15 m³ di volume risulta 610 m.

4. CONCLUSIONI

L'insieme di eventi oggetto del presente studio, pur se appare derivare da particolari sequenze di circostanze e da avvenimenti e fenomeni interconnessi tra loro o generati da sinergie non comuni, non risulta un caso sporadico ad un esame dei casi storicamente registrati di incidente. In genere si rileva la compresenza di evenienze non facili da descrivere mediante modelli di simulazione che, per definizione, idealizzano la realtà per poterla rappresentare mediante algoritmi.

La molteplicità di variabili in gioco porta poi ad un'ulteriore difficoltà di applicazione dei modelli che spesso spiega anche il contrasto di risultati forniti da teorie o programmi diversi.

D'altronde, lo studio di fenomeni complessi come quelli oggetto del presente studio ha anche contribuito allo sviluppo di modelli sofisticati che possono meglio rappresentare la dinamica di questi eventi.

Dall'applicazione eseguita appare infatti evidente che le indicazioni fornite da modelli comunemente utilizzati per l'analisi di rischio, se possono fornire indicazioni anche cautelative e comunque utili a titolo previsionale, appaiono meno indicati per la ricostruzione o lo studio di casi complessi come quello in oggetto, in particolare per la simulazione della diffusione di gas pesanti in ambienti con presenza di ostacoli e/o ad orografia complessa, per i quali è necessario ricorrere a modelli di calcolo a 3D soprattutto in assenza di vento.

Le indicazioni fornite dai modelli più semplici, comunemente in uso per le valutazioni e previsioni sui rischi di incidente rilevante, che in genere sono comunque da considerare come stime di massima, dovrebbero anche essere analizzate alla luce della congruenza con la situazione descritta, in funzione delle caratteristiche e limiti del modello.

Soddisfacente può invece essere definito il modello sviluppato per la ricostruzione del fenomeno di cedimento strutturale della prima cisterna, anche se l'affinamento delle variabili di input, tra cui il carico termico in funzione del tempo, può essere indicato come area di miglioramento.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Pasquill's stability categories - Tabella 15.14 ed al. Lees 2^a ed. 1996 - 15/89-94
- [2] Nuclear Regulatory Commission - Loss prevention in the process industries - Lees 1996 - Tab. 15.23
- [3] BLEVE Research - A.M. Birk - Queen's University of Kingston - Ontario - Canada - 1997 (<http://conn.me.queensu.ca/birk>)
- [4] "Le esplosioni BLEVE: rischi e misure preventive" - Antincendio agosto 1987
- [5] API RP521 Guide for pressure-relieving and depressuring system - 1997
- [6] Hazards from propane BLEVE: An update and proposal for emergency responders - A. M. Birk - J. of Loss Prev. Process Industries - Vol 9 n° 2 1996.