

ESPLOSIONE SULLA PETROLIERA “MARIA E.” ALLA RADA DEL PONTILE SARAS DI SARROCH (CA), VERIFICATASI IL GIORNO 11.11.1996. ANALISI DEL FENOMENO, RICERCA DELLE CAUSE E MISURE DI PREVENZIONE A BORDO DELLE NAVI.

Ing. Luciano Cadoni, Ispettore Antincendio Coordinatore Vice Comandante Comando Provinciale Vigili del Fuoco di Cagliari.

Comando Provinciale VV.F. Cagliari , 09100 Cagliari, Viale Marconi snc; tel. 070-4093313, fax 070-4093327.

SOMMARIO

Una semplice ricerca bibliografica è sufficiente a dimostrare che in Italia, a differenza di altri paesi, soprattutto di cultura anglo-sassone, le tecniche di investigazione sulle cause degli incendi e delle esplosioni , sono state finora scarsamente sviluppate.

Al riguardo il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco è da qualche anno impegnato in un vasto programma di formazione nello specifico settore che ha coinvolto, fra i primi destinatari, anche l’Autore.

L’incidente della petroliera Maria E. di qualche anno fa, ha fornito l’occasione allo stesso, che ha partecipato direttamente alle operazioni di soccorso, di applicare le tecniche proposte in occasione dei corsi organizzati dagli uffici centrali del C.N.VV.F.

Il lavoro, pertanto, si articola in diverse fasi di indagine per giungere alla ricostruzione dell’evento compatibile con gli effetti riscontrati.

Prescindendo dai risultati finali, si ritiene interessante il metodo di lavoro che, logicamente, deve essere supportato da quelle conoscenze specifiche sui fenomeni incidentali che, in definitiva, determinano il grado di attendibilità dei risultati.

La sera dell’11 Novembre del 1996 una esplosione confinata di una nube di vapori di benzina devasta il sottocastello prodiero della petroliera.

Tale esplosione è avvenuta durante le operazioni di ventilazione del locale con sorgente di innesco non individuata univocamente.

L’articolo ripropone la fondamentale importanza della formazione professionale nel quadro dell’organizzazione della sicurezza aziendale, elemento che completa ed integra le altre misure di prevenzione e protezione predisposte al fine di rendere minimi i rischi per la specifica attività.

TESTO

1. INTRODUZIONE

Dall’esame delle statistiche elaborate dal Ministero dell’Interno e da alcune compagnie di assicurazione, si evince che le cause non accertate degli incendi/esplosioni riguardano il 40%-60% del totale degli eventi [4] [6].

La difficoltà di investigare sull’evento incendio dipende, come noto, dalla molteplicità dei fattori che regolano i processi di combustione ed inoltre dal fatto che lo scenario dell’evento viene normalmente stravolto, sia dagli effetti dell’incendio che dalla stessa opera di spegnimento e di soccorso.

D’altra parte l’investigazione completa dei sinistri è di fondamentale importanza per l’elaborazione di statistiche sempre più attendibili e, in conseguenza, per la messa a punto di misure di prevenzione appropriate per ogni tipo di attività.

Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, da diversi anni, sta portando avanti un programma di formazione professionale in tale settore (Corsi di Fire and Explosion Investigation), che ha già coinvolto un gran numero di Tecnici e che utilizza il grande patrimonio di esperienza maturato dal Corpo in quasi 60 anni di attività.

Le metodologie proposte in tali corsi [6] [7], sono state utilizzate nel presente lavoro, dimostrandosi un valido strumento per lo studio del sinistro e per la ricerca delle probabili cause.

In generale, l’investigazione di un incendio/esplosione può essere svolta seguendo le fasi appresso elencate:

1. Ricostruzione del “fatto”;
2. Ricostruzione “stato dei luoghi” (scenario dell’evento);
3. Analisi delle conseguenze;
4. Ricerca punti ed aree singolari;

5. Eventuali analisi di laboratorio;
6. Analisi degli indizi e delle prove;
7. Ricostruzione dinamica “evento coerente”;
8. Cause possibili e cause probabili;
9. Conclusioni.

Per quanto riguarda la ricostruzione dell’evento, compreso lo scenario nel quale esso si è svolto, è di fondamentale importanza poter disporre di tutti quegli elementi necessari a ridisegnare locali e strutture prima del sinistro, con le relative funzioni.

E’ altresì importante raccogliere in modo sistematico le testimonianze dei protagonisti della vicenda, compresi i soccorritori, che con il loro lavoro possono avere, anche solo in parte, modificato lo scenario preesistente.

L’analisi delle conseguenze, invece, consiste in un lavoro minuzioso di valutazione degli effetti meccanici e termici, necessaria a formulare ipotesi di partenza, eventualmente perfezionabili, per la ricostruzione della dinamica dell’evento.

Quest’ultima presuppone, logicamente, la conoscenza dei principi chimico-fisici che regolano i singoli eventi incidentali.

La ricerca delle cause di innesco, infine, utilizzando il lavoro svolto in precedenza, oltre alla conoscenza delle caratteristiche proprie dei singoli combustibili, deve fare riferimento sia alle statistiche esistenti che alle esperienze dirette dell’investigatore, per giungere ad ipotizzare fra quelle possibili le cause più probabili.

Nel presente lavoro è stato seguito, in linea di massima, lo schema sopra riportato, tranne che per i punti 5 e 6, in quanto l’Autorità Giudiziaria, che ha immediatamente avviato un’ inchiesta sulle cause del sinistro, ha messo la nave sotto sequestro pochi giorni dopo l’incidente.

2. RICOSTRUZIONE DEL FATTO

Alle ore 22,30 del giorno 11.11.1996 una violenta esplosione distrugge il sottocastello prodiero della M/C “Maria E.” all’ancora al largo della raffineria Saras di Sarroch (CA), con conseguente sviluppo di un incendio successivamente domato dal personale di bordo e dai mezzi navali giunti immediatamente sul luogo dell’incidente (Foto 1.).



Foto 1. La prua della nave devastata dall’esplosione.

Il boato dell’esplosione viene udito chiaramente dagli abitanti dei centri situati sul golfo di Cagliari, entro un raggio di circa 20 km dal luogo del sinistro, abitanti che, preoccupati, tempestano di telefonate il centralino dei Vigili del Fuoco del Comando di Cagliari.

Nell'incidente due marinai, che al momento dell'esplosione si trovavano vicino al ponte del castello di prua, vengono proiettati lontano e subiscono gravi traumi; uno di loro cade in mare e viene immediatamente recuperato.

La petroliera "Maria E.", battente bandiera Cipriota, ha gettato l'ancora a circa un miglio da Sarroch intorno alle ore 21,30, proveniente dal porto di Bengasi, in Libia, dove ha conferito un carico di benzina prelevato dallo stesso stabilimento Saras.

La sera le operazioni di carico in raffineria vengono generalmente sospese e, pertanto, non è stato autorizzato l'attracco al pontile. La nave deve quindi attendere, ancorata in rada, la mattina del giorno seguente, prima di poter effettuare le operazioni di carico. Tale circostanza, ad incidente avvenuto, è apparsa assolutamente provvidenziale, in quanto le conseguenze dell'esplosione, in caso di nave ormeggiata sul pontile, sarebbero state ben più gravi.

La M/C Maria E. è stata costruita nel 1978 in Giappone, ha dimensioni di 96.00x15.50x79.00 metri con stazza lorda di Tonn. 3794, netta Tonn. 2103 e può trasportare fino a Tonn. 6009 di idrocarburi distribuiti in 12 cisterne (6 a sinistra e 6 a destra) (vedi Fig. 1.). Il Registro di Classificazione della nave è il Bureau Veritas che, a seguito di visite periodiche od occasionali, ispeziona e, in caso di esito favorevole, rilascia i Certificati internazionali necessari all'impiego del mezzo. Tutta la certificazione attestante l'efficienza dell'unità navale, sino al momento del sinistro, è in corso di validità.

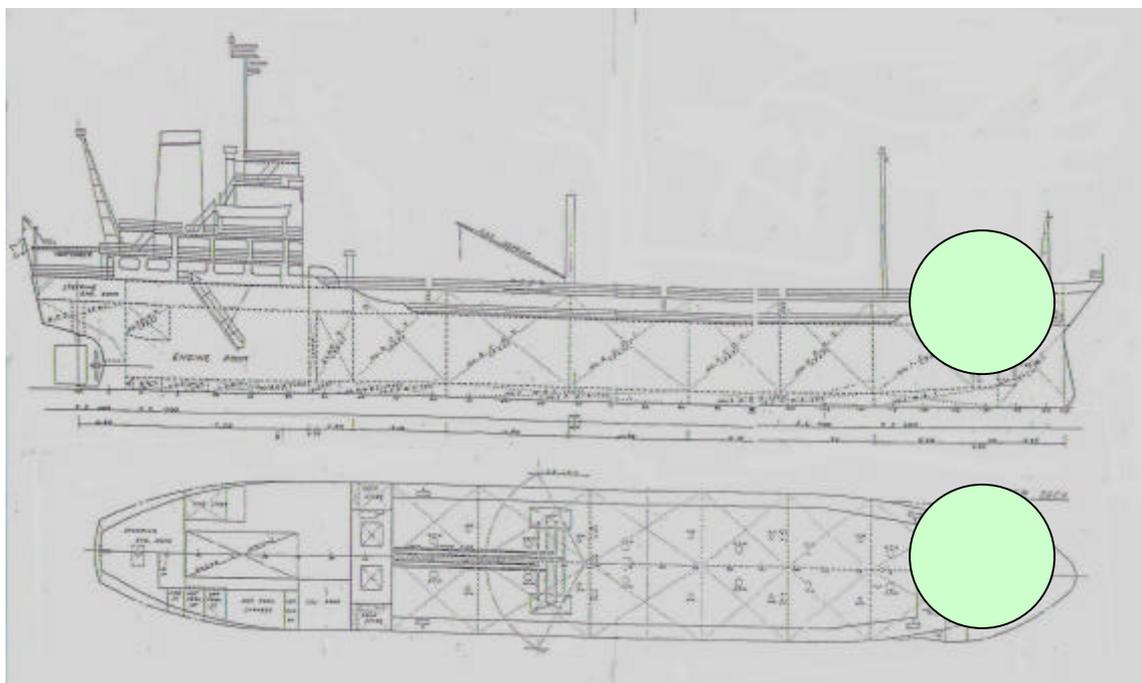


Fig. 1. Disegni della nave con l'indicazione del locale interessato dall'esplosione.

Durante le operazioni di ancoraggio il Nostromo, che in quel momento si trova a prua, avverte un forte odore di benzina proveniente dall'interno del castello di prua. Poco dopo, il Comandante dispone allo stesso Nostromo ed al Primo ufficiale di accedere all'interno del deposito per prelevare un ventilatore ad acqua con una manica a vento, al fine di arieggiare il locale mediante aspirazione dall'interno verso l'esterno; detta operazione inizia circa alle ore 22.00. Intorno alle 22.30, la nave è scossa da una violenta esplosione ed è immediatamente interessata da un incendio localizzato a prua.

L'incendio, alimentato evidentemente da una modesta quantità di combustibile, si estingue in breve tempo, anche grazie all'intervento di mezzi navali antincendio fra i quali la Motobarca del Comando VV.F. di Cagliari. Nonostante il grave danneggiamento subito la nave non affonda.

3. ESAME DELLO SCENARIO

Lo scenario che si presenta ad incendio domato consente, senza ombra di dubbio, di individuare il locale all'interno del quale si è verificata l'esplosione: si tratta proprio del succitato castello o deposito di prua (bosun's store), il quale si presenta completamente devastato e con le pareti di delimitazione squarciate e piegate verso l'esterno.

Tale locale, del volume di circa 230 mc, è normalmente adibito a locale di deposito per cordami, tavole di legno, catene ed altri materiali; all'interno, inoltre, sono collocati i motori principale e secondario di azionamento dei ventilatori necessari al lavaggio delle cisterne, ventilatori che, al momento dell'incidente, non risultavano in funzione. Il ponte superiore (f'cle deck) delimitante la parte alta del locale in questione, risulta completamente sollevato e svergolato; le catene delle ancore, collegate ai vericelli (winch), evitano il distacco completo del ponte medesimo (vedi Foto 2).



Foto 2. Vista laterale della nave con il ponte squarciato e sollevato dall'esplosione.

Le lamiere del piano di calpestio (upper deck), invece, non risultano deformate tranne i due chiusini dei passi d'uomo di accesso al locale pompe ed al gavone anteriore, i quali risultano in posizione regolare ma deformati verso il basso.

La zona di massima devastazione è localizzata in corrispondenza della prua della nave, nella giunzione delle lamiere delle fiancate laterali.

Le pareti esterne al deposito risultano, inoltre, segnate da innumerevoli scalfiture di varie dimensioni causate, evidentemente, dalla proiezione violenta di oggetti metallici: uno di questi, in particolare, ha perforato la parete esterna della cisterna di carico n.1, provocando uno squarcio di circa 30 cm di lunghezza.

Osservando i suddetti effetti si può senz'altro ritenere che si sia verificata una deflagrazione, con sviluppo di un'onda di pressione ad alto contenuto energetico.

Come noto, le esplosioni si possono definire, in via generale, rilasci di energia quasi istantanei, capaci di generare un'onda di pressione che si propaga nello spazio circostante [1].

Le esplosioni si classificano in detonazioni ed in deflagrazioni: le prime hanno velocità di reazione supersonica mentre le seconde hanno velocità di reazione subsonica [1] [2].

Le deflagrazioni possono essere laminari o turbolente. In quest'ultimo caso la velocità di avanzamento del fronte di fiamma può essere dell'ordine anche di decine di m/s.

Nelle detonazioni, invece, l'onda d'urto che si propaga nel sistema reagente raggiunge una velocità dell'ordine delle migliaia di m/s.

Poiché tale velocità è maggiore della velocità del suono, la pressione non è uniforme nello spazio ma presenta un massimo in corrispondenza dell'onda d'urto, che può essere anche di alcune decine di volte maggiore della pressione iniziale [8].

Per tale motivo le detonazioni sono più distruttive rispetto alle deflagrazioni, per le quali, invece, la massima sovrappressione in condizioni confinate può essere compresa fra 8 e 10 volte il valore iniziale [12].

Tuttavia forse più importante della pressione massima, ai fini della valutazione della violenza di una esplosione, risulta essere la velocità con la quale la pressione massima viene raggiunta.

Il gradiente di pressione (dp/dt), infatti, condiziona il valore dell'impulso di pressione e quindi, in definitiva, il valore del carico dinamico sulla struttura.

Nelle esplosioni che avvengono all'interno di recipienti chiusi, in presenza di una singola sorgente di ignizione, si può considerare che la variazione della pressione con il tempo avvenga con legge approssimativamente cubica (cubic law). La violenza dell'esplosione, pertanto, è influenzata non solo dalla natura e dalla composizione della miscela, ma anche dal volume in cui l'esplosione ha luogo.

La legge che caratterizza la massima velocità di variazione della pressione $(dp/dt)_{max}$ può essere espressa nel seguente modo:

$$(dp/dt)_{max} V^{1/3} = K \quad [2]$$

dove la costante K è caratteristica di ogni tipo di combustibile (gas o polveri).

I valori sperimentali della sovrappressione massima e della massima velocità di variazione della pressione sono tabellati per le principali sostanze [8], mentre non sono generalmente noti per la benzina, essendo una miscela di idrocarburi con composizione estremamente variabile.

Il comportamento di una struttura investita da un'onda esplosiva dipende, oltre che dai normali parametri di resistenza meccanica, caratteristici del materiale, e dagli schemi statici, anche dalle caratteristiche inerziali del sistema (massa e periodo proprio di vibrazione) ed inoltre dalle caratteristiche proprie dell'onda di pressione.

La trattazione del comportamento della struttura sottoposta a carichi dinamici, sia nel campo elastico che nel campo elasto-plastico, risulta molto complessa ed esula dagli scopi del presente lavoro. Nella parte finale, tuttavia, accenneremo al problema ipotizzando, come suggerisce qualche autore [13], un'equivalenza fra carico statico e carico dinamico capaci di produrre gli stessi effetti sulla struttura.

Si tratta, ovviamente, di tentativi di semplificare il problema per i quali occorre avere la consapevolezza dei relativi limiti.

Per le miscele di idrocarburi in aria, si può ritenere che la combustione sia generalmente di tipo deflagratorio, e, qualora la stessa avvenga all'interno di un volume chiuso anche parzialmente, essa viene definita esplosione confinata (CVE, Confined Vapour Explosion) [1] [2].

Premesso quanto sopra, nelle valutazioni che seguono verrà considerato il fenomeno deflagratorio. Dimosteremo che gli effetti sulla struttura sono compatibili con tale ipotesi.

4. ANALISI DELLE CONSEGUENZE E DINAMICA DELL'ESPLOSIONE.

La ricostruzione dell'incidente, lo scenario dell'evento e l'analisi dei danni sulla struttura della nave, ci consente di affermare, come già detto, che quella sera si è verificata una esplosione, quasi totalmente confinata, di una miscela di vapori di idrocarburi in aria (CVE), inizialmente presenti all'interno del deposito prodiero.

Considerando che la superficie del passo d'uomo (0.49 mq) risulta pari a circa lo 0.1% della superficie totale del deposito e considerando che tale valore risulta di gran lunga inferiore ai coefficienti previsti per la prevenzione delle esplosioni con l'uso dei sistemi di sfiato (venting) [4] [12], adotteremo l'ipotesi dell'esplosione totalmente confinata.

E' dimostrato, infatti, che piccole aree di sfiato, in rapporto alle dimensioni del contenitore, non sono in grado di depressurizzare il sistema specie quando la deflagrazione è veloce, quando cioè avviene in condizioni turbolente [11].

Vedremo come l'ipotesi di un innesco al di fuori del deposito, sopra il passo d'uomo, rafforzi ulteriormente tale assunzione di partenza.

Effettueremo ora una valutazione quantitativa del fenomeno, con l'obiettivo di ricercare la possibile quantità di benzina che doveva essere contenuta all'interno del locale ed i valori di alcune grandezze caratteristiche dell'esplosione.

Nel paragrafo successivo cercheremo invece di ipotizzare i motivi della presenza della benzina in un locale dove doveva esserci tutt'altro materiale, ed, inoltre, le cause più probabili per l'innesco della miscela esplosiva.

Dalle schede di sicurezza dei vari tipi di benzina fornite dalla Saras, si deduce per le stesse un campo di infiammabilità in aria [2] [4], in condizioni normali, compreso fra 1.4 % (limite inferiore) ed 7.6 % (limite superiore).

Detti limiti, come noto, rappresentano la minima e la massima quantità di combustibile che può sostenere la propagazione della fiamma.

Considerando che il volume del deposito è pari a circa 230 mc (vedi Fig. 2), si ottiene che la quantità di vapori presente al momento dell'esplosione doveva essere compresa fra i seguenti estremi minimo e massimo:

$$V_{min} = 230 \cdot 1.4\% = 3.22 \text{ mc}$$

$$V_{max} = 230 \cdot 7.6\% = 17.48 \text{ mc}$$

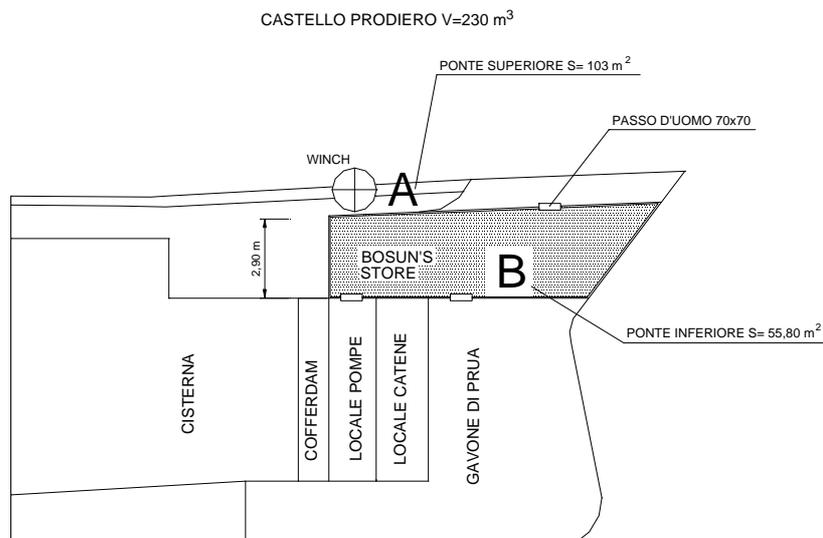


Fig. 2 Particolare del locale prodiero

Per determinare, anche se in modo orientativo, il quantitativo di benzina allo stato liquido che ha originato la nube infiammabile, in mancanza della esatta composizione della miscela di idrocarburi e quindi della relativa formula chimica, possiamo utilizzare il coefficiente di espansione volumetrica liquido-vapore. Dalle schede delle sostanze pericolose del Sistema Sigem-Simma del Ministero dell'Interno C.N.VV.F. [5], ricaviamo: $C=154.462635$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ponendo la temperatura interna del deposito pari a quella esterna e supponendo, considerata l'ora e la stagione, che la stessa fosse uguale a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, dovremmo rivalutare in difetto il suddetto coefficiente. Tuttavia per gli scopi del presente lavoro e considerando il grado di approssimazione del metodo, si assume $C=154$ alla temperatura di $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Si ottiene pertanto un volume liquido compreso fra i due estremi:

$$V_{11} = (3.22:154) = 0.020909 \text{ mc, approssimando } V_{11} = 21 \text{ litri;}$$

$$V_{21} = (17.48:154) = 0.113506 \text{ mc, approssimando } V_{21} = 113 \text{ litri.}$$

Si ricava pertanto un primo risultato interessante in quanto la presenza di appena qualche decina di litri di benzina può essere stata sufficiente a causare con adeguato innesco, l'esplosione dirompente che ha determinato i danni sopra descritti. In pratica, poiché l'esplosione è avvenuta durante la ventilazione del deposito, si può ritenere che l'atmosfera fosse inizialmente sovra satura di vapori e che sia passata, dopo circa 20 minuti di ventilazione, in campo di esplosività per riduzione della concentrazione in aria. Possiamo quindi ipotizzare, in mancanza di elementi certi sulle modalità del rilascio, la presenza all'interno del deposito prodiero di qualche centinaio di litri di benzina. D'altra parte la presenza del liquido infiammabile è giustificata anche dall'incendio seguito all'esplosione, incendio che non si sarebbe potuto sostenere solo con il materiale solido presente nel deposito.

Per una valutazione quantitativa, anche se empirica, dell'esplosione, imposteremo la simulazione dell'evento incidentale (esplosione confinata di nube di idrocarburi all'interno di un contenitore), con il programma Sigem-SIMMA Codice Confex [5] che ci fornirà diversi elementi utili a valutare l'entità del fenomeno.

Il Sigem-Simma è un sistema in dotazione al C.N.VV.F., che consente di eseguire una valutazione di massima dell'impatto fisico dovuto agli eventi incidentali, finalizzato alla gestione delle emergenze (grossi incendi, esplosioni, rilasci di sostanze tossiche, ecc.) e per questo motivo risulta logicamente conservativo.

Dobbiamo pertanto aspettarci dati in uscita leggermente sovrastimati.

In generale, comunque, per gli idrocarburi i valori attesi della sovrappressione massima, in condizioni adiabatiche, non sono superiori a 8 bar. [2]

Per quanto riguarda la determinazione della pressione interna di collasso del contenitore, si è utilizzato un metodo di calcolo delle deformazioni con l'analisi agli elementi finiti, che ha consentito di ricostruire una deformata sufficientemente vicina alla condizione reale. Nelle conclusioni parleremo più diffusamente anche di questo aspetto mentre, per la simulazione incidentale, adatteremo il risultato dalla suddetta analisi che consiste in un valore del carico uniformemente distribuito su tutte le superfici interne pari a 0,30 bar.

Il sistema Sigem-Simma partendo dai dati geometrici del locale, da quelli caratteristici della sostanza e dalle condizioni meteorologiche, consente di ottenere in uscita i parametri caratteristici dell'esplosione nelle ipotesi di deflagrazione della nube infiammabile e di rottura in pochi grandi frammenti del contenitore.

Il modello alla base del calcolo considera la teoria del TNT equivalente (tritolato equivalente), e quindi si fonda sulla analogia degli effetti prodotti da un esplosivo solido, come il TNT, che risulta molto più semplice da studiare rispetto alle nubi esplosive.

I dati di ingresso da inserire nel programma sono i seguenti:

- Sostanza: benzina: 100 litri;
- Volume del contenitore: 230 mc;
- Grado di riempimento del contenitore: 0.04%;
- Pressione atmosferica: 1 bar;
- Temperatura esterna: 10°C;
- Umidità relativa: 65%;
- Temperatura interna: 10°C;
- Pressione interna: 1 bar;
- Pressione esterna: 1 bar;
- Periodo di analisi: notte;
- Nebulosità: reottavi;
- Velocità del vento: 2,5 m/s;
- Classe di stabilità: F;
- Pressione di collasso del contenitore: 0,3 bar;

In uscita il programma fornisce:

- Pressione massima di esplosione: 8 bar;
- Energia di espansione disponibile: 10 Kcal/kg;
- Energia chimica totale: 11560466 Kcal;
- Energia di espansione totale: 11585 Kcal;
- Energia totale disponibile: 11572051 Kcal;
- Energia unitaria TNT: 1120 Kcal/kg;
- Massa equivalente TNT: 10332 kg;
- Energia disponibile per pressione: 4628820 Kcal;
- Energia disponibile per missili: 6943231 Kcal;
- Massa equivalente TNT per pressione: 4133 kg;
- Massa equivalente TNT per missili: 6199 kg;

oltre alla mappa delle sovrappressioni, le distanze caratteristiche di danno e le distanze di ricaduta dei frammenti.

I risultati, nel confermare la massima sovrappressione tipica delle esplosioni di vapori di idrocarburi, evidenziano energie in gioco elevatissime, pur considerando il carattere conservativo del metodo.

Nelle conclusioni evidenzieremo che tali risultati ben si associano allo scenario reale ed alla risposta delle strutture agli effetti dell'onda d'urto.

5. RICERCA DELLE CAUSE PIU' PROBABILI DELL'ESPLOSIONE

Il primo elemento sul quale indagare è quello relativo ai motivi della presenza della benzina in un locale dove doveva essere custodito altro tipo di materiale.

Al riguardo osserviamo che il castello di prora è separato nettamente dalle cisterne di carico e non risulta presente alcuna tubazione di collegamento con le stesse. Si deve inoltre escludere la possibilità che del carburante fosse contenuto nel gavone sottostante, in quanto lo stesso è stato riempito d'acqua di mare, per la stabilità della nave, prima della navigazione dal porto di Bengasi a quello di Sarroch.

Si deve inoltre ragionevolmente escludere la possibilità che eventuali vapori di benzina siano passati dal locale pompe al deposito, in quanto il portello di comunicazione era chiuso anche dopo l'esplosione ed in quanto i vapori di benzina risultano più pesanti dell'aria.

D'altra parte appare improbabile che significative quantità di vapori di benzina possano essere entrate, accidentalmente, nel castello prodiero attraverso il passo d'uomo esistente sul ponte superiore; quanto sopra

sia per le ridotte dimensioni del passaggio (70x70 cm), che per la mancata attuazione di qualsiasi operazione di ventilazione delle cisterne dopo lo scarico del prodotto nel porto di Bengasi.

Non può invece escludersi a priori la possibilità che durante la precedente carica di benzina in Sarasiano siano fuoriusciti, dalle valvole di sovrappressione o dai portellini di sondaggio presenti in ogni cisterna, dei vapori che, spinti dal vento, si sono incanalati sopra il passo d'uomo del deposito. Tale circostanza appare, tuttavia, come già detto, abbastanza improbabile.

Il motivo che si ritiene più plausibile rimane quello secondo cui un certo quantitativo di benzina liquida (che abbiamo visto ammontare a qualche centinaio di litri di prodotto), fosse consapevolmente presente all'interno del locale.

Al riguardo si può, ad esempio, ipotizzare che, avendo riscontrato una perdita di prodotto dalle cisterne di carico di prua che confluiva nel locale pompe attraverso il cofferdam, si sia voluto aspirare questa benzina depositandola in fusti proprio nel deposito prodiero. In ogni caso si può ritenere che la presenza di tale prodotto fosse comunque nota al personale di bordo della nave.

Per quanto riguarda l'innescò, escludendo la volontarietà dell'azione, rimangono da analizzare due grandi categorie di cause [6]:

- Cause elettriche;
- Cause non elettriche.

Per quanto riguarda le cause elettriche possiamo adottare la seguente classificazione [6]:

- a) energia elettrostatica;
- b) fulmine;
- c) effetto joule;
- d) falso contatto;
- e) arco elettrico;
- f) corto circuito;
- g) sovraccarico.

Poiché al momento dell'incidente il cielo era sereno dobbiamo senz'altro escludere la causa b).

Per quanto riguarda l'impianto elettrico del deposito di prua, è da dire che lo stesso risultava del tipo antideflagrante, in analogia alle altre parti di impianto presenti sulla petroliera, mentre dalle indagini svolte è emerso che al momento dell'esplosione non vi erano nel locale apparecchi in tensione fatta eccezione per le lampade dell'impianto di illuminazione e per i quadri elettrici di alimentazione dei ventilatori e dei verricelli. Si devono pertanto ragionevolmente escludere le cause f) e g).

Per quanto riguarda le cause c) d) ed e) le stesse non possono, a priori, essere escluse in quanto non si conoscono le reali condizioni di manutenzione dell'impianto elettrico; le custodie antideflagranti, infatti, se danneggiate, non assolvono più al loro scopo di evitare l'innescò della eventuale nube infiammabile. Consideriamo pertanto un falso contatto, l'effetto termico di riscaldamento di un conduttore oppure un arco elettrico, come cause possibili.

Rimane, inoltre, la possibilità che durante l'operazione di ventilazione del gavone si siano generate cariche elettrostatiche che ad un certo istante sono state drenate su un punto a minor potenziale elettrico. Tale ipotesi risulta però assai improbabile trattandosi di flusso di vapori e non di liquidi infiammabili.

Indaghiamo ora sulle cause non elettriche, che possiamo classificare, per le navi cisterna, nel modo seguente [8] [10]:

- h) fiamme libere (comprese sigarette e fiammiferi);
- i) superfici calde di macchinari e tubazioni;
- j) scintille di attrito per urto o caduta di parti metalliche;
- k) impulsi di pressione;
- l) particelle incandescenti di scarichi di caldaia o motori;
- m) autocombustione.

La lettura delle singole voci, considerato che al momento del sinistro non erano in corso lavori di alcun tipo e che non erano in funzione apparecchiature di sorta, fatta eccezione per il ventilatore ad acqua con girante antiscintilla posto sul ponte del locale, ci porta ad individuare, come causa possibile dell'innescò, la presenza di fiamme libere, quali ad esempio sigarette accese, durante le operazioni di ventilazione.

Al proposito è bene ricordare che la temperatura della sigaretta accesa è di circa 290 °C senza tiraggio e di circa 430 °C con tiraggio [6]. Detta temperatura è pertanto superiore a quella di autoaccensione della benzina (280 °C) mentre l'apporto di energia è certamente superiore ai valori minimi richiesti per innescare la maggior parte delle miscele esplodibili [8].

Sulle petroliere il permesso di fumare è concesso a discrezione del Comandante solo per determinati locali e/o determinati periodi.

In ogni caso il divieto di fumare ed usare fiamme libere è normalmente esteso anche ai locali di deposito

del nostromo ed a tutti i ponti esterni, anche in assenza di operazioni particolarmente pericolose come quella in questione.

D'altra parte l'analisi storica effettuata mediante la consultazione della banca dati Mhidas (Major hazard incident data service) [9] su un totale di 9674 incidenti, ha evidenziato che nei 96 incidenti coinvolgenti navi cisterna adibite al trasporto di sostanze pericolose, il 34% della cause sono da attribuire a fattore umano.

Nonostante, pertanto, le rigide regole vigenti sulle navi cisterna che trasportano infiammabili, non possiamo escludere fra le cause più probabili dell'esplosione, assieme a quelle derivanti dall'impianto elettrico, anche quelle delle fiamme libere.

6. RICOSTRUZIONE DELL'EVENTO E CONCLUSIONI

Da quanto sopra esposto, si può ricostruire con ragionevole probabilità lo svolgimento dei fatti che hanno determinato l'esplosione.

All'interno del sottocastello di prora risultava presente, forse in uno o più contenitori, un certo quantitativo di benzina che ha generato una nube di vapori, riscontrata quella sera dal Nostromo a seguito del forte odore che fuoriusciva dal passo d'uomo.

Durante le operazioni di ventilazione del locale, la grave disattenzione di almeno uno dei due marittimi che si trovavano sul ponte, oppure il cattivo funzionamento di un componente elettrico del locale prodiero, ha causato l'innescò alla miscela che, incendiandosi, ha propagato la fiamma all'interno del deposito, causando la deflagrazione della nube di vapori contenuta nel locale.

Al riguardo la circostanza dell'innescò esterno, nel rendere ininfluyente l'apertura del passo d'uomo ai fini della sovrappressione, aumenta l'energia di innescò dell'esplosione dovuta alla fiamma che penetra all'interno del locale.

I risultati dei calcoli sugli effetti dell'onda d'urto, che ha raggiunto una pressione massima di circa 8 bar (0,8 MPa) con una energia disponibile equivalente a quella di circa 10 tonn. di TNT, danno ragione della forte devastazione subita dalla prua della nave.

Ipotizzando, infatti, la struttura metallica del sottocastello di prora costituita da una lamiera nervata di 10/12 mm di spessore, con irrigidimenti di ferri piatti da 10/20 cm di altezza ad interasse 60 cm, si può determinare la resistenza di tale struttura, anche se in modo approssimato, utilizzando modelli elementari di calcolo che sotto l'azione di carichi crescenti, riproducono, con sufficiente approssimazione, le deformate riscontrate nella realtà e nel contempo consentono di individuare le sezioni critiche di rottura.

I carichi considerati sono costituiti oltre che dalla pressione indotta dall'esplosione, considerata applicata in condizioni statiche, dal peso dei verricelli salpa ancore e dal tiro della catena di dritta.

Il primo modello elementare considera una sezione longitudinale del ponte superiore con due schematizzazioni che rappresentano i due tempi di probabile rottura del ponte superiore: la prima prevede due incastrati perfetti alle estremità, la seconda prevede un estremo libero e simula la fase di distacco del ponte dall'estremità della prua, a seguito della quale la superficie del ponte stesso ruota verso l'alto fino ad assumere la posizione finale visibile nelle foto.

Il secondo modello elementare rappresenta il comportamento della sezione trasversale, sempre in corrispondenza dei verricelli salpa ancore.

Procedendo per approssimazioni successive si ottengono, oltre i diagrammi dei momenti flettenti e del taglio, le deformate della struttura che, nella simulazione finale, risultano molto vicine alla realtà per valori della pressione pari a circa 0,3-0,4 bar (30-40 kPa). E' da considerare che tali valori si riferiscono a carichi statici ed a deformazioni del materiale ancora in campo elastico. Per tenere conto del carattere dinamico del fenomeno, anche se approssimativamente, e della risposta del materiale in campo elasto-plastico, potremmo tentare di ricostruire la curva di variazione del fattore di attenuazione del carico dinamico in funzione della durata dell'impulso e del periodo proprio di vibrazione della struttura [13]. Non volendoci addentrare, però, nel problema specifico e non avendo d'altra parte neanche i dati necessari per svolgere l'analisi, possiamo osservare che, considerando la struttura nel suo complesso, la resistenza del sistema aumenta con l'aumentare della velocità di applicazione del carico, ed, in conseguenza, il carico dinamico, a parità di deformazione, risulta superiore al carico statico [13] [14].

In tale ipotesi, per ricercare il carico dinamico di collasso, dovremmo incrementare il valore della pressione di rottura ottenuto in precedenza, mediante il fattore di attenuazione che è generalmente superiore ad 1 [13].

Il risultato di tale operazione, in ogni caso, ci porta a concludere che la resistenza di qualsivoglia struttura, per quanto robusta possa essere, è sempre notevolmente più bassa del carico dinamico provocato dall'esplosione confinata; al riguardo, infatti, i metodi di prevenzione si basano quasi esclusivamente sul criterio del "venting" cioè sulla possibilità di depressurizzare rapidamente i contenitori mediante una o più superfici di sfogo [12].

E' bene osservare, inoltre, che l'impostazione semplificata del modello dinamico delle strutture, peraltro utilizzabile in molti casi, prescinde totalmente dalle caratteristiche locali dei materiali e pertanto è applicabile, generalmente, alle deflagrazioni, caratterizzate da velocità di propagazione relativamente basse; si è constatato, invece, che nelle esplosioni detonanti il collasso della struttura avviene, talvolta, a partire da rotture fragili localizzate, per valori del carico sensibilmente più bassi rispetto a quello necessario per il collasso in condizioni statiche.

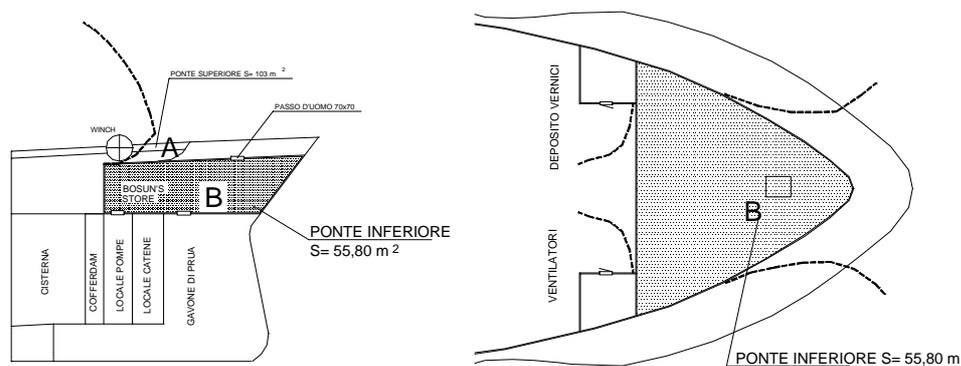


Fig. 3 Rappresentazione danni alla prua.

Affrontando, invece, il problema della resistenza strutturale da un punto di vista strettamente pratico, per confrontare i danni registrati nel caso in esame con quelli causati da onde d'urto con valori di sovrappressione noti, conviene osservare le tabelle di effetti sulle strutture e sugli edifici di vario tipo, redatte sulla base delle osservazioni sperimentali [8]: esse mostrano come valori della sovrappressione dell'ordine di 0,4-0,5 bar (40-50 Kpa) causano danni analoghi a quelli osservati sulla prua della nave e, pertanto, assumiamo tale limite come la resistenza strutturale del locale prodiero sotto l'azione di quella determinata onda di pressione.

Interessante è la modalità di rottura della struttura del deposito prodiero, dedotta dall'indagine con il metodo delle deformazioni, che conferma il fatto che è avvenuta una deflagrazione e non una detonazione, in quanto le onde d'urto, probabilmente una principale ed una seconda riflessa, hanno prima aperto la prua della nave e successivamente hanno sollevato il ponte; abbiamo, quindi, danni indirizzati e non uniformi.

Nel caso delle detonazioni, invece, si riscontrano effetti pressochè uguali in tutte le direzioni a causa della forte accelerazione del fenomeno.

L'evento esaminato dimostra, ancora una volta, che il "fattore umano" nella gestione del "sistema sicurezza" rimane un elemento fondamentale e che pertanto oltre alle misure di prevenzione impiantistiche e strutturali, occorre assolutamente curare l'organizzazione e la formazione interna del personale, per garantire l'osservanza delle necessarie condizioni di esercizio e per prevenire lo sviluppo di fenomeni le cui conseguenze, come dimostrato, sono spesso non fronteggiabili.

I risultati dell'analisi, inoltre, ci confermano l'impressione iniziale di grande sollievo, pensando che un tale fenomeno, con la nave ormeggiata al pontile, avrebbe potuto generare una catena di eventi incidentali con conseguenze gravissime.

In conclusione, si auspica che, in caso di sinistri di un certo rilievo, possano essere raccolte sistematicamente tutte le informazioni derivanti da una investigazione accurata, al fine di implementare le banche dati esistenti a supporto delle analisi incidentali ed inoltre al fine di mettere a punto strategie di prevenzione adeguate ad ogni tipo di attività.

RINGRAZIAMENTI

Un doveroso ringraziamento vada all'Ing. Giorgio Falqui, che ha messo gentilmente a disposizione informazioni relative alla nave ed alla sequenza degli eventi; alla Soc. Tecsa, che ha fornito alcuni dati

relativi alle cause degli incidenti a bordo delle navi cisterna; all'Ing. Giovanni Mozzoni, che ha elaborato i calcoli strutturali ed all'Ing. Pierpaolo Gessa che ha collaborato per la parte grafica.

Un ringraziamento particolare, infine, al Prof. Antonio Viola, Ordinario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, per la preziosa consulenza scientifica.

SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

- CA = Cagliari;
- C.N.VV.F. = Corpo Nazionale Vigili del Fuoco;
- CVE = Confined Vapour Explosion;
- (dp/dt) = gradiente di pressione;
- m = metro;
- mc = metro cubo;
- mq = metro quadrato;
- M/C = Motonave Cisterna;
- Tonn. = tonnellate;
- TNT = trinitrotoluene;
- V = volume.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Marchini, *Cenni sulla combustione-Le esplosioni*, Informazione (1993).
- [2] A. Cascarino, *Introduzione alla prevenzione incendi*, Vol.1, pp. 36-74, p.334 (1986).
- [3] P. Cardillo, *Alcuni aspetti delle esplosioni di nubi non confinate di gas e vapori*, ENI Sicurezza nell'ambiente di lavoro N. 11, (1980).
- [4] G. Elifani, *La prevenzione incendi nella piccola e media industria*, EPC, p. 37, p.174 (1986).
- [5] Ministero dell'Interno-Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco-Tema s.p.a., *Sistema Sigem/Simma, Gestione banca dati sostanze pericolose-archivio Coro e interventi di emergenza*, (1993).
- [6] M. D'Addato, *Corso di "Fire and explosion investigation"*, I.S.A. (1996).
- [7] M. Marchini, *Corso di "Fire and Explosion Investigation"*, I.S.A. (1996).
- [8] I. Pasquon-G. Pregaglia, *Principi di chimica industriale, Rischi potenziali, sicurezza e protezione ambientale*, Vol. 4, p.70, p.75, p.85, (1993).
- [9] Tecs Iberica, *Banca dati Mhidas*, Versione Ottobre 1998.
- [10] SNAM S.p.a., *Norme di sicurezza-Settore trasporti marittimi* III edizione (1977).
- [11] G. Fiore, M. Bazzicchi, P. Cecchella, *Simulazione di transitori di pressione durante esplosioni all'interno di edifici*, Convegno VGR 1998.
- [12] NFPA 68, *Guide for venting of deflagration*, 1994 Edition.
- [13] S. Ragusa, *Introduzione all'analisi del rischio nell'industria*, Ed. Safety Improvement, p.184, (1986).
- [14] C.H. Vervalin, *Fire Protection Manual for hydrocarbon processing plants*, Volume 1, Third Edition, p.346, (1985).