

ESPLOSIONE IN UN IMPIANTO DI RICONDIZIONAMENTO E COLLAUDO DI BIDONI DI GPL. ANALISI DELL'INCIDENTE E LEZIONI IMPARATE.

Ing. Alberto TINABURRI

*Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile
Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica – Area II
Piazza Scilla,2 00178 ROMA
cse16@telvia.it

SOMMARIO

La relazione descrive l'incidente avvenuto all'interno di un'attività di ricondizionamento e collaudo di bidoni di gpl. Il ciclo lavorativo inizia con la fase di bonifica effettuata in maniera automatica da macchine operatrici sotto la supervisione degli operatori. La sequenza operativa prevedeva il caricamento del bidone su una rulliera di trasporto, la pesatura, la rimozione del gruppo valvolare ed il lavaggio con aria compressa ed acqua. Il gpl che si libera durante tale fase viene captato da un sistema di aspirazione collegato ad una sezione di trattamento degli effluenti prima del rilascio in atmosfera. L'esplosione ha provocato la distruzione della tubazione d'adduzione degli effluenti gassosi all'unità di trattamento, il ferimento di due operai, la rottura di vetri nel raggio di qualche decina di metri e la proiezione di frammenti. La relazione illustra l'analisi delle cause e la definizione delle misure tecnico - gestionali intraprese per ridurre il rischio, garantendo più elevati standard di sicurezza.

1. DESCRIZIONE DEL CICLO LAVORATIVO

L'unità produttiva in cui è avvenuto l'incidente opera nel settore della manutenzione e collaudo dei bidoni utilizzati per il contenimento di gpl, con capacità singola compresa fra 10 e 25 kg. I bidoni giungono allo stabilimento consegnati a mezzo di autotrasportatori, raggruppati su appositi pallets metallici. L'attività si sviluppa principalmente attorno a due distinte linee di lavorazione a funzionamento semi automatico. La prima, posta all'esterno di un fabbricato, sotto una tettoia ad esso adiacente, è quella in cui avviene la bonifica dei bidoni. La seconda, posta all'interno del fabbricato, è quella in cui si eseguono le operazioni di manutenzione e collaudo dei bidoni. Al reparto di bonifica dei bidoni è funzionalmente collegato un impianto per il trattamento degli effluenti emanati durante l'operazione di rimozione del gruppo valvolare dei bidoni (vedi planimetria dell'impianto in figura 1).

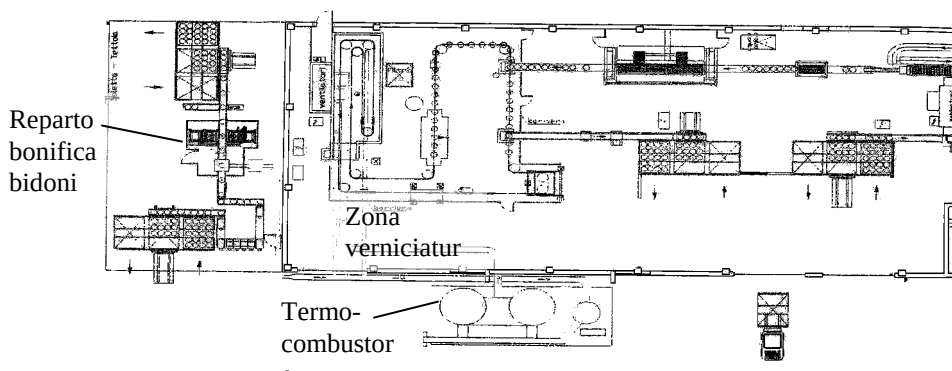


Figura 1. Planimetria dell'unità produttiva.

1.1 Reparto di bonifica dei bidoni gpl

La sequenza delle lavorazioni svolte per bonificare i bidoni, all'atto dell'incidente, era la seguente:

- Consegna dei bidoni da ricondizionare a mezzo di autotrasportatori terzi, raggruppati in pallets metallici.
- Controllo manuale dell'effettiva chiusura dei gruppi valvolari affinché non avvengano dispersioni in atmosfera di gpl e mercaptani (utilizzati come agente odorizzante).

- Posizionamento dei pallets in arrivo su macchina operatrice (“spintore depallettizzatore”) che provvede automaticamente ad immettere i singoli bidoni sulle rulliere di movimentazione.
- Pesatura (tramite bilancia elettronica) dei bidoni in modo da scartare quelle con contenuto eccessivo di gas (valutato in relazione alla “tara” del bidone).
- Trasporto automatico mediante rulliere dei singoli bidoni all’interno dell’unità di svitamento del gruppo valvolare posto sull’ogiva del bidone. A tale scopo viene utilizzato un mandrino dotato di pinze atte ad afferrare la valvola che viene svitata mediante rotazione del mandrino stesso. L’operazione è eseguita sotto aspirazione per evitare la dispersione in atmosfera del gpl residuo contenuto nei bidoni..
- Movimentazione, sempre in automatico dei bidoni all’unità di lavaggio/asciugatura. L’acqua in pressione di cui necessita l’apparecchiatura di lavaggio, per una perfetta pulizia dei bidoni, è fornita da una idropulitrice a funzionamento elettrico, posta all’interno del fabbricato. L’asciugatura è effettuata insufflando aria compressa. I reflui liquidi del lavaggio sono inviati ad un impianto di depurazione.
- Ripalettizzazione in automatico dei bidoni bonificati e spostamento all’interno del fabbricato per le successive operazioni di manutenzione e collaudo dei bidoni.

1.2 Impianto di termocombustione

Al reparto di bonifica dei bidoni è funzionalmente collegato un impianto di termocombustione (del tipo termico-rigenerativo), progettato in sostituzione di una colonna di lavaggio rivelatasi di scarsa efficacia nell’abbattimento delle sostanze organiche volatili utilizzate per odorizzare il gas. Con l’installazione di tale nuova unità, in fase di primo avviamento alla data dell’incidente, erano state realizzate anche due modifiche alla configurazione impiantistica. La prima, con l’obiettivo di recuperare parte del calore sensibile dei fumi di combustione, ne prevedeva il prelievo di una parte e la diluizione con aria ambiente per regolarne la temperatura, da inviare al forno di essiccazione nel reparto di verniciatura dei bidoni. La seconda, prevedeva di alimentare in ingresso al combustore anche la corrente aspirata in corrispondenza delle postazioni di “saldatura”, con successivo rilascio all’atmosfera tramite il camino dell’impianto di termocombustione.

Lo schema impiantistico dell’unità di termocombustione (in figura 2) prevede che la corrente da trattare nel termocombustore attraversi un serbatoio di compensazione, D-1, collegato al ventilatore principale, B-1. Quindi mediante un ciclo di aperture/chiusure di due valvole deviatrici (del tipo a tre vie), AV-1 e AV-2, coordinate e programmate da un PLC, la corrente attraversa in maniera alternata le torri di preriscaldamento E-1 ed E-2 per raggiungere la camera di combustione K-1, con bruciatore BR-1 posto all’interno della condotta di collegamento fra le due torri (nella parte alta dell’impianto). In tale zona, i gas caldi permangono ad alta temperatura per un tempo sufficiente a favorire la completa ossidazione delle sostanze organiche.

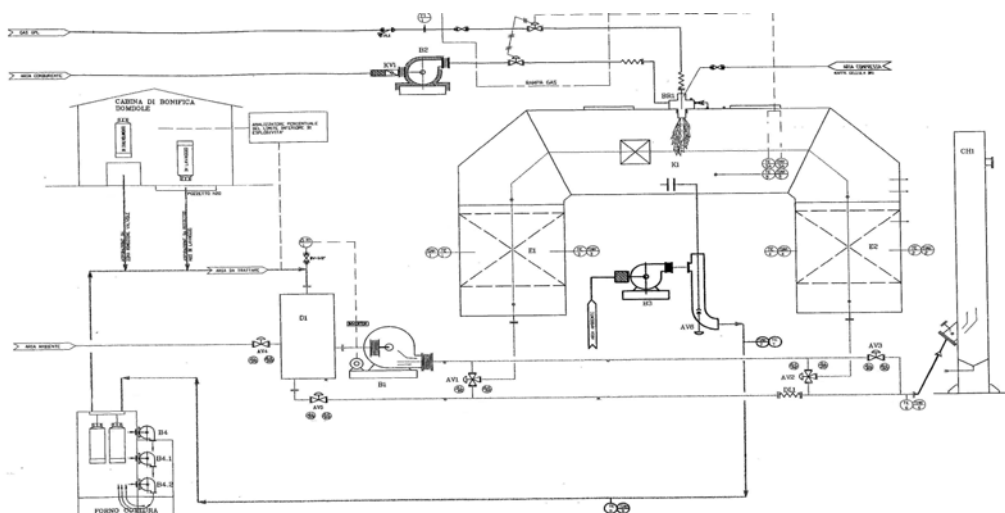


Figura 2. Schema di flusso del termocombustore e del sistema di aspirazione.

Il bruciatore ausiliario BR-1 è necessario per il preriscaldamento dell’impianto in fase di avviamento e per assicurare (ove necessario) il mantenimento della corretta temperatura di combustione (circa 800°C) durante il funzionamento. Durante l’avviamento dell’unità di termocombustione, l’effluente è costituito esclusivamente da aria prelevata dall’ambiente tramite l’apertura della valvola motorizzata AV-4.

L’impianto è di tipo termico-rigenerativo in quanto al gas da trattare viene preriscaldato nel passaggio

attraverso le torri mediante il calore generato dalla combustione. Le due torri di scambio termico, infatti, mediante aperture e chiusure alternate di due valvole, AV-1 e AV-2, sono percorse rispettivamente una volta dal gas caldo proveniente dalla camera di combustione (fase di riscaldamento del letto di materiale ceramico utilizzato per l'accumulo termico) ed il ciclo successivo dal gas da trattare che viene preriscaldato (fase di cessione del calore).

In definitiva abbiamo in ciascuna delle due torri un gradiente termico in funzione dell'altezza che per effetto delle frequenti inversioni va da quella della camera di combustione a quella della corrente da trattare nella prima torre ed a quello di rilascio al camino (superiore di circa 50°C a quella di ingresso dell'effluente) nella seconda.

Il recipiente D-1 è pure collegato al collettore di uscita dalle due torri tramite una valvola motorizzata, AV-5, detta di compensazione, con lo scopo di evitare di scaricare direttamente all'atmosfera gas non trattato (contenuto nel volume geometrico all'interno della torre che ha lavorato nella fase di riscaldamento e nel relativo condotto di trasferimento) durante la fase di inversione del flusso, permettendo di realizzare un ricircolo a monte dell'impianto.

I controlli automatici dell'impianto prevedono due regolazioni fondamentali. La prima serve per il controllo della temperatura della camera di combustione attraverso la modulazione della portata di gas alimentato al bruciatore (la portata di aria di combustione viene aggiustata di conseguenza per mantenere un rapporto costante, in base all'eccesso d'aria fissato). La seconda è necessaria per regolare la depressione nella condotta di aspirazione degli effluenti da trattare, variando tramite inverter il numero di giri del motore del ventilatore principale dell'impianto B-1.

Pertanto lo stato di marcia del ventilatore principale, la corretta posizione delle valvole deviatrici, lo stabilirsi di una depressione superiore ad un valore minimo, una temperatura superiore ad un valore minimo nella camera di combustione costituiscono una serie di condizioni *sine qua non* è possibile avviare le unità operative a monte (reparti di bonifica e di verniciatura).

Nel caso che una delle valvole deviatrici non assuma nel tempo previsto (qualche secondo) la posizione corretta, oltre a mandare in blocco le unità collegate (bonifica e verniciatura), si apre una valvola di by-pass AV-3 che mette in comunicazione il collettore di entrata con quello di uscita per lo scarico al camino. Analogamente in caso di raggiungimento di temperature eccessive nelle due torri dell'impianto di termocombustione.

E' evidente l'importanza delle valvole di inversione. In caso di mancato funzionamento le conseguenze potrebbero essere il surriscaldamento di una torre o, in caso di chiusura di entrambe, il blocco del flusso.

1.3 Reparto di verniciatura, saldatura e collaudo dei bidoni

Dopo la bonifica, i bidoni vengono avviati all'interno del fabbricato per le successive lavorazioni svolte in maniera pressoché automatizzata. Il ciclo lavorativo è articolato nelle seguenti fasi:

- Posizionamento dei pallets in arrivo su macchina operatrice ("spintore depallettizzatore") che provvede automaticamente ad immettere i singoli bidoni sulle rulliere di movimentazione.
- Sabbatura dei bidoni per togliere lo strato di vernice esistente (macchina dotata di autonomo impianto di aspirazione).
- Controllo manuale ed a vista dei bidoni sabbiati. In caso si rilevino bidoni con presenza di malformazioni o fratture, sempre tramite rulliere, vengono inviati alla zona officina dove sono riparati oppure direttamente scartati. In tale area sono presenti postazioni di saldatura ove operano un massimo di due addetti. Le saldatrici sono esclusivamente di tipo elettrico.
- I bidoni vengono poi reimessi in linea ed avviati all'unità di riempimento con acqua (operazione simultanea per un massimo di 4 bidoni).
- Immissione dei bidoni all'interno dell'unità di collaudo che provvede in automatico alla prova idraulica alla pressione di 30 bar per un determinato periodo di prova ed al successivo svuotamento dell'acqua.
- Sempre automaticamente, i bidoni che superano il collaudo vengono inseriti nella linea aerea a catena che provvede a trasferirli all'interno della cabina di verniciatura a polvere (pigmenti inorganici). La cabina, anch'essa funzionante in automatico, risulta dotata di sistema autonomo di aspirazione che impedisce qualsiasi fuoriuscita di materiali e sostanze al suo esterno.
- La linea aerea a catena trasferisce poi i bidoni all'interno del forno di essiccazione della vernice a polvere, ove stazionano per circa 25 minuti a 200°C. Il calore necessario per il fissaggio dei pigmenti viene fornito da una corrente di aria/fumi caldi prelevata dal termocombustore e ad esso restituiti.
- Infine, dopo una operazione di verifica della tara, si compie l'ultima operazione di riavvitamento del gruppo valvolare e ripallettizzazione dei bidoni prima della spedizione ai clienti.

Tale reparto risultava connesso funzionalmente al nuovo impianto di termocombustione con due linee: la prima era costituita dai condotti di aspirazione posizionati in prossimità delle postazioni di saldatura, la seconda dalle tubazioni di trasferimento della corrente di aria/fumi caldi inviati al forno di essiccazione.

2. DESCRIZIONE DELLO SCENARIO INCIDENTALE

In fase di primo avviamento dell'impianto di termocombustione, avvenuto nell'estate del 2003, si è verificata un'esplosione che ha comportato la distruzione completa della condotta di collegamento fra l'impianto di bonifica dei bidoni di gpl ed il recipiente di compensazione posto all'ingresso della nuova unità.

Tale condotta, utilizzata per il by-pass della colonna di lavaggio precedentemente impiegata per il trattamento degli effluenti (aria e vapori di gpl), era stata provvisoriamente realizzata con una tubazione, avente un diametro di circa 400 mm ed una lunghezza di circa 7 m, di materiale plastico rinforzato con spirale metallica incorporata e da un breve tratto metallico. Il percorso di tale tubazione seguiva le pareti perimetrali del fabbricato, utilizzate per realizzare i supporti per l'appoggio della condotta.

A seguito della propagazione dell'onda di sovrappressione, sono stati registrati danni agli infissi (prevalentemente rottura di vetri) posti sia all'interno dell'azienda che all'esterno in attività limitrofe, distanti alcune decine di metri, con proiezione a distanza di frammenti di tubazione e del lamierino d'alluminio utilizzato per il contenimento dell'isolamento termico. *Last but not the least*, la propagazione dell'onda di sovrappressione ha provocato delle lesioni ai due operai che erano addetti all'impianto di bonifica dei bidoni, più gravi per quello che stazionava in prossimità della centralina di comando (foto n. 1) rispetto all'altro, che stazionava sul lato opposto della tettoia, in posizione abbastanza defilata rispetto alla zona di origine dell'esplosione.



Foto n. 1. Posto operatore con il pannello di comando nella zona di bonifica.



Foto n.2. Rulliera per il trasporto bidoni. Si noti la deformazione del pannello.

Si noti anche la deformazione e lo spostamento con proiezione a distanza di alcuni pannelli leggeri installati nella zona di svalvolamento e lavaggio dei bidoni, causato dal passaggio dell'onda di sovrappressione meccanica (con flessione del pannello dall'esterno verso l'interno, foto n. 2 e n. 3).



Foto n.3 Cabina svalvolamento.



Foto n. 4. Colonna precedentemente utilizzata per il trattamento effluenti.

Notevole anche il danneggiamento della colonna di lavaggio in materiale plastico precedentemente utilizzata per il trattamento degli effluenti gassosi, posta anch'essa sotto la tettoia in adiacenza all'impianto di bonifica. Tale impianto, come già detto, era al momento dell'incidente non in funzione. La colonna mostra chiaramente i segni della deformazione dall'esterno verso l'interno (foto n. 4), presumibilmente attribuibile all'impatto diretto di spezzoni della condotta di by-pass esplosa, che correva in quel tratto in prossimità di tale apparecchiatura.

Indice della potenza dell'esplosione sono anche alcune lesioni della muratura esterna del capannone ed al portone in corrispondenza del percorso della tubazione distrutta (foto n. 5, n. 6, n. 7, n.8).



Foto n. 5. Si noti, in prossimità dello spigolo della parete, lo spezzone residuo della tubazione esplosa (zona bonifica bidoni sotto tettoia).



Foto n. 6. Proseguendo nel percorso della tubazione, si nota la completa distruzione della stessa ed il danno al portone.



Foto n. 7. Ancora in sequenza, si nota, la deformazione del lamierino di alluminio impigliato intorno all'appoggio.

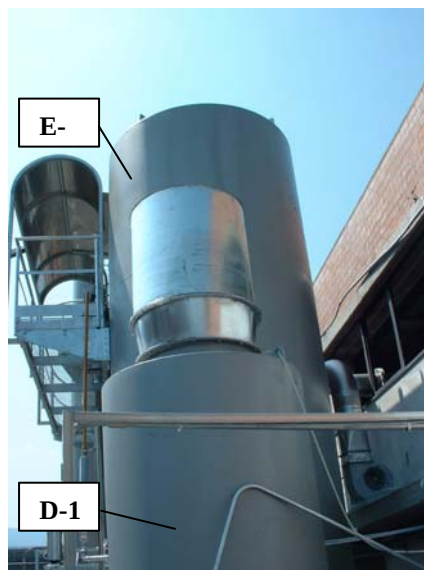


Foto n. 8. Proseguendo nel percorso della tubazione, si individua lo spezzone terminale collegato al serbatoio di compensazione D-1.

Lato impianto di termocombustione, si è osservata la deformazione della cassa del ventilatore principale di aspirazione B-1 (foto n. 9), la fuoriuscita dalle carrucole di guida delle pulegge di trasmissione della forza motrice dal motore elettrico all'albero del ventilatore B-1 (foto n. 10), l'allentamento dei bulloni di serraggio alla fondazione del recipiente di compensazione D-1 (foto n. 11) e la rottura parziale dei soffietti di flessibili in materiale tessile di collegamento del ventilatore alla tubazione (foto n. 12).

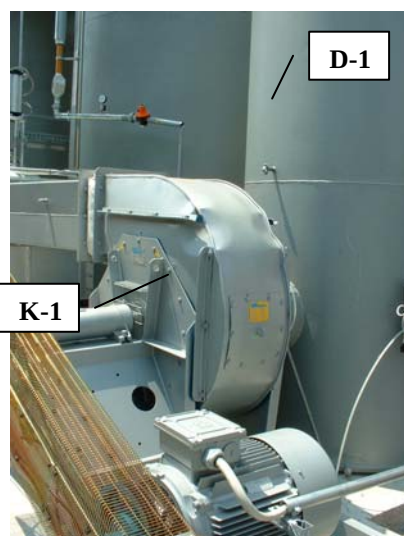


Foto n. 9. Ventilatore di aspirazione. Si noti il gonfiamento della voluta.



Foto n. 10. Dettaglio della puleggia di azionamento del ventilatore K-1.



Foto n.11. Dettaglio giunto antivibrante.

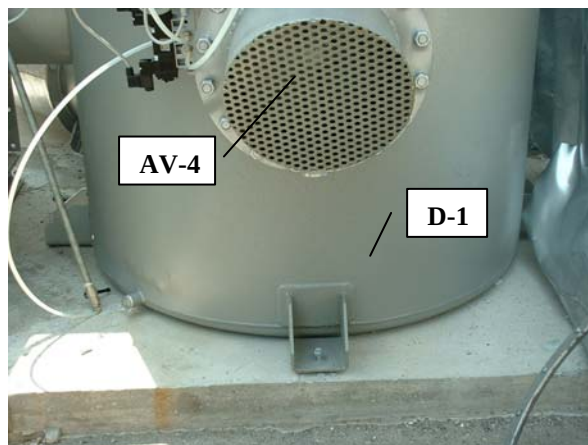


Foto n. 12. Dettaglio dell' ancoraggio del serbatoio.

L'aspetto esterno del termocombustore non rivelava all'apparenza altri segni particolari (vedi foto n. 13).

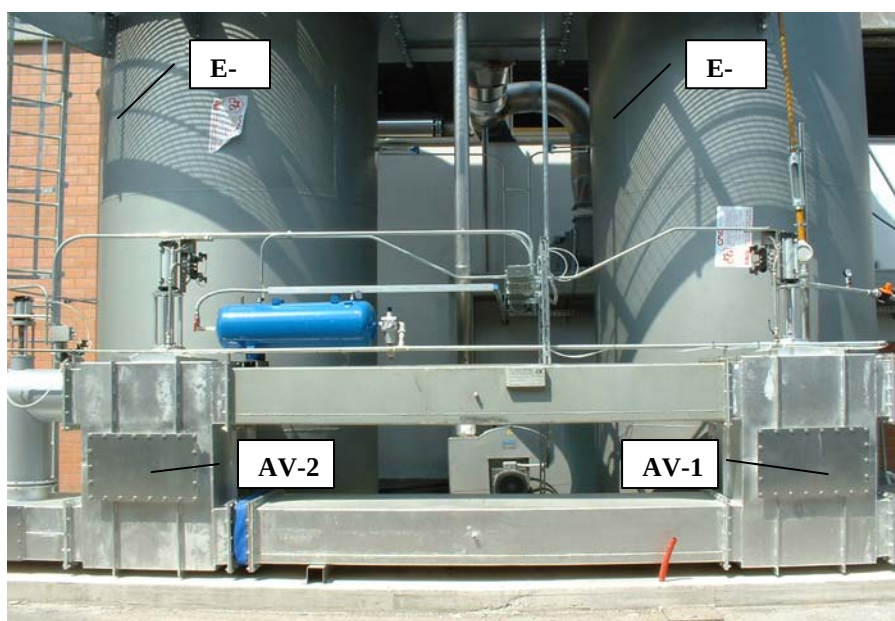


Foto n. 13. Prospetto dell'impianto di termocombustione. In primo piano i collettori di alimentazione alle torri/ uscita al camino con le valvole a tre vie d'inversione del flusso.

L'ispezione interna delle apparecchiature e delle tubazioni, eseguita successivamente, ha evidenziato i seguenti aspetti:

- Nel ventilatore principale B-1, in esecuzione anti-scintilla, non è stata trovata alcuna traccia che possa fare ipotizzare un'origine di innesco dell'esplosione. La deformazione della carcassa del ventilatore si può attribuire alla propagazione dell'onda esplosiva originatasi e propagatasi all'interno della condotta di collegamento con il reparto bonifica.
- Le valvole deviatrici sono risultate perfettamente integre ed ancora funzionanti, e con posizione in accordo con i comandi impartiti dal sistema elettro-pneumatico.
- In uno dei condotti, quello inferiore, che mettono in comunicazione le valvole AV-1 ed AV-2, il ventilatore, la valvola di compensazione ed il camino, sono stati rinvenuti i due semidischi appartenenti all'otturatore della valvola AV-5, i quali, al momento dell'esplosione sono stati divelti dalla valvola e proiettati l'uno in prossimità della valvola e l'altro in prossimità del camino.
- L'esame delle griglie di sostegno delle masse ceramiche nelle due torri E-1 ed E-2 non ha evidenziato alcuna deformazione.

L'onda d'urto meccanica provocata dall'esplosione ha causato la rottura degli infissi vetrati e la deformazione di alcune porte poste in un limitrofo fabbricato dell'azienda, orientato parallelamente al percorso della condotta ed al termocombustore (foto n. 14).



Foto n. 14. Vista dei danni agli infissi nel fabbricato n.14 to antistante l'impianto di termocombustione. capannone sul-



Foto n.15. Sequenza (in senso orario) della foto n.14. Si noti la rottura dei vetri anche nel capannone sullo sfondo, all'esterno del perimetro aziendale.

La rottura degli infissi vetrati si è verificata anche in alcune Ditte limitrofe (foto n. 15,16,17).



Foto n.16. Sequenza (in senso orario) della foto n. 15. Si noti l'assenza di danni in questa costruzione posta sul lato opposto della tettoia.



Foto n.17. Sequenza (in senso orario) della foto n. 16. Ancora rottura vetri in fabbricato esterno, posto lato opposto rispetto al termocombustore (per propagazione dell'onda d'urto attraverso il fabbricato interno adiacente al termocombustore).

3. INVESTIGAZIONE SULLE CAUSE

È noto che affinché si possa verificare un'esplosione occorre la contemporanea presenza di tre elementi:

- Il combustibile (nel caso specifico gpl);
- Il comburente (l'ossigeno contenuto nell'aria ambiente aspirata dalla zona di svalvolamento dei bidoni);
- Composizione della miscela combustibile-comburente all'interno del campo d'infiammabilità e superamento della temperatura di autoignizione, mediante l'apporto energetico fornito da un idoneo innesco (calore, scintilla, scarica elettrostatica, ecc.).

E' altresì noto che in ambienti confinati e con combustibili allo stato gassoso premiscelati con l'aria, la combustione può avvenire in condizioni estremamente "veloci" tali da dare luogo ad una *deflagrazione* o *detonazione*, che nel linguaggio comune vengono genericamente indicate come "esplosioni".

L'esplosione si caratterizza quindi per un rilascio improvviso e violento dell'energia prodotta dalle reazioni chimiche di combustione, e specie se il fenomeno avviene all'interno di una tubazione, può dar luogo ad un'esplosione che si propaga accelerandosi ("*propagating explosion*") a partire dal punto di innesco. Il principale effetto delle esplosioni è quindi la generazione di un'onda d'urto meccanica ("*shock wave*" o "*blast wave*"), con proiezione di frammenti e rottura di infissi e vetri a distanza. Secondari e trascurabili gli effetti ed i danni legati al rilascio di calore.

Nel caso di deflagrazioni la miscela gassosa infiammabile brucia a velocità relativamente bassa. Per miscele aria-idrocarburi la velocità di deflagrazione è dell'ordine di 1 m/s.

Nelle detonazioni il fenomeno fisico è molto differente. Il fronte di fiamma viaggia come un'onda d'urto meccanica seguita da vicino da un'onda di combustione che rilascia l'energia necessaria per sostenerla, con meccanismo autoaccelerante, sino a raggiungere la velocità del suono che varia in relazione alla natura del fluido ed alla temperatura. Per miscele aria-idrocarburi, la velocità di detonazione è tipicamente dell'ordine di 2000-3000 m/s (per riferimento, la velocità del suono in aria a temperatura ambiente è di circa 330 m/s).

Una detonazione genera onde di pressione più potenti ed è più distruttiva di una deflagrazione. Il picco di pressione in apparecchiature (spazi confinati) raggiunge gli 8 bar per le deflagrazioni mentre può arrivare a 20 bar per le detonazioni. Una deflagrazione può subire una transizione a detonazione in relazione alle specifiche caratteristiche geometriche e fluidodinamiche del sistema fisico in cui si realizza il processo. La letteratura tecnica sottolinea in particolare che ciò è particolarmente verosimile per deflagrazioni che si propagano all'interno di tubazioni [1],[2].

L'esplosione di una miscela infiammabile presente in un'apparecchiatura od in una tubazione può quindi dar luogo ad una deflagrazione o ad una detonazione, quest'ultima essendo particolarmente distruttiva. E' oggetto di discussione in ambito scientifico se il limite di esplodibilità sia identico a quello di infiammabilità o più ristretto. Se la sorgente di ignizione è sufficientemente forte, la detonazione può iniziare direttamente. In alternativa, si può avere all'inizio una deflagrazione e poi una transizione a regime di detonazione, in particolare in tubazioni.

Ciò premesso, nell'incidente descritto, la formazione di una miscela gpl-aria con composizione all'interno del limite di esplodibilità, è possibile unicamente nella zona di svalvolamento e nel connesso impianto di aspirazione. Durante il transitorio di efflusso dai bidoni, il gas viene inevitabilmente a miscelarsi con l'aria dell'ambiente circostante. La velocità di efflusso del gas dal bidone e quindi la durata del transitorio di depressurizzazione dipende essenzialmente dallo stato fisico del gas nel bidone, *in primis* dall'eventuale presenza di fase liquida in equilibrio con la fase vapore, e dalla temperatura interna. Come noto, per un sistema bifase (mono-componente) la pressione interna è legata in maniera univoca alla temperatura, che, nel caso dei recipienti di gas liquefatti, segue quella ambientale. In caso di presenza di fase liquida nel bidone, quindi, durante l'efflusso la pressione del gas tende a rimanere costante, se lo consentono le condizioni di scambio termico fra le fasi contenute nel bidone e l'ambiente circostante.

Il dimensionamento dell'impianto di aspirazione (in particolare le caratteristiche di portata e prevalenza del ventilatore di aspirazione) dovrebbe essere tale da garantire una composizione della miscela aria-gpl al di sotto del limite di infiammabilità inferiore. La potenziale presenza di quantitativi di gpl in fase liquida all'interno del bidone rende critica la valutazione del rapporto di diluizione effettivo (stante la notevole differenza dei volumi specifici del gpl in fase liquida ed in fase gassosa). Anche le condizioni ambientali giocano un ruolo importante. Infatti solitamente i bidoni da bonificare sostano all'aperto esposti direttamente all'irraggiamento solare. La pressione all'interno dei bidoni è quindi più alta d'estate che d'inverno e conseguentemente maggiori sono le velocità di efflusso e diverse le modalità di diluizione con l'aria aspirata.

La completa distruzione della tubazione di collegamento al combustore e l'entità dei danni riscontrati, fanno ritenere che la miscela esplodibile fosse presente per un lungo tratto della condotta, eventualmente facilitata dalla presenza nei bidoni trattati di gpl in fase liquida (e quindi con volumi di vapori emanati superiori a quelli di progetto del sistema di aspirazione).

Più delicata e complessa appare la ricerca dell'innescò.

Gli indizi e le evidenze riscontrate durante la ricognizione dello scenario incidentale, tendono a supportare l'ipotesi che l'esplosione non ha avuto origine dall'impianto di termocombustione (principalmente per fenomeni di flash-back).

La lunghezza del condotto metallico di aspirazione dei fumi di saldatura, anch'essi inviati al termocombustore, la presenza di numerose curve a gomito e dislivelli, il notevole quantitativo di aria fresca aspirata, sono tutti fattori che rendono poco plausibile che ad innescare l'esplosione sia stata una scoria incandescente, che captata dagli aspiratori posti sulle cappe, sia potuta arrivare a contatto con la miscela aria-gas proveniente dal reparto di bonifica dei bidoni ancora sufficientemente calda.

Le foto n. 18 e n. 19 mostrano i danni subiti dalle tubazioni di andata/ritorno della corrente prelevata dal combustore ed inviata al forno di essiccazione, evidenziando che le stesse sono state tranciate in corrispondenza dell'attraversamento del portone di accesso in adiacenza al quale correva la tubazione esplosa.

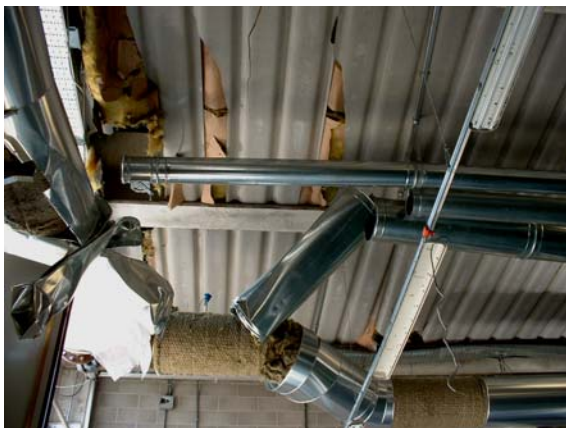


Foto n. 18. Dettaglio danneggiamento tubazioni andata e ritorno al forno di essiccazione (ripresi dall'interno del fabbricato, all'altezza del portone).



Foto n. 19. Valvola AV-6 di regolazione del flusso di fumi caldi alimentati al forno di essiccazione.

Non potendo imputare l'innesco dell'esplosione né a scintille o scorie incandescenti provenienti dal reparto di saldatura, e neppure ad alcun elemento dell'impianto di termocombustione, resta solo da ipotizzare che l'innesco si sia verificato nella fase di bonifica dei bidoni e successiva aspirazione.

La ridotta velocità di rotazione del mandrino rende poco probabile che durante la rimozione del gruppo valvolare si siano potute generare scintille di natura meccanica (ad es. per sfregamento con qualche parte metallica). Neppure sono stati rinvenuti in prossimità dei meccanismi di svalvolamento componenti elettrici fuori norma a cui possano addebitarsi l'emissione di scintille o surriscaldamento a seguito di corto circuito (peraltro l'impiantistica elettrica di tale area era stata già oggetto nei mesi precedenti di intervento di riqualificazione).

In letteratura [1], è riportato che durante la fase di depressurizzazione, per le particolari condizioni fluidodinamiche e termodinamiche che si realizzano durante l'efflusso, il getto di gas che fuoriesce dal bidone assume la forma di un aerosol, con presenza di gocce di gpl liquido, mescolate a particelle oleose e detriti di varia natura sempre presenti nei bidoni da revisionare. In tali condizioni, specie condizioni di flusso critico che comporta il raggiungimento di velocità soniche nell'orifizio che alloggia il gruppo valvolare, si possono generare cariche elettrostatiche. La particolare natura della tubazione di trasferimento (completamente esplosa), di grande diametro, realizzata in materiale isolante ma con inglobate spire metalliche, può avere contribuito ad accumulare le cariche elettrostatiche. In tal modo può essersi originato un campo elettrico che al superamento della tensione dielettrica del mezzo isolante può dar luogo a scintille, suscettibili di innescare un'esplosione.

4. LA MODIFICA DEL CICLO PRODUTTIVO A SEGUITO DELL'INCIDENTE

L'analisi delle cause e dell'evoluzione dell'evento verificatosi è il primo e fondamentale momento nell'investigazione degli incidenti, sia che venga svolta con il fine di avviare il successivo procedimento di accertamento delle responsabilità in sede giudiziaria, sia per quanti, con diverse competenze (professionisti, organi di controllo e vigilanza, azienda), *dopo l'incidente*, devono proporre e valutare le misure tecnico-gestionali idonee a prevenirne il ripetersi, facendosi garanti dei nuovi standard di sicurezza sia per i lavoratori che operano all'interno dell'insediamento produttivo che per la collettività.

L'analisi di rischio e la valutazione della sicurezza ha permesso di evidenziare le seguenti criticità:

La concentrazione media della miscela aria-gpl captata nella tubazione di adduzione, *ceteris paribus*, dipende dal quantitativo di gpl emesso durante l'efflusso e quindi dal volume del bidone, e con maggiore importanza, dalla presenza o meno di fase liquida al suo interno, che una volta depressurizzata può produrre quantità notevolissime di fase gassosa. Dato il notevole scarto che si ha sulla tara dei singoli bidoni (a seconda del produttore), si può avere una quantità anche consistente di gpl in fase liquida (circa 1 kg) senza che il bidone venga scartato in modo automatico. Nel determinare, con adeguato margine di sicurezza il valore della portata di aria di diluizione necessaria, occorre tenere in adeguata considerazione il transitorio di depressurizzazione e miscelazione dei vapori di gpl con l'aria ed il pericolo connesso alla formazione in alcune zone spaziali e per un determinato transitorio, di miscele con composizione all'interno dei limiti di esplosibilità, stante anche la natura discontinua del processo produttivo.

La possibilità di poter operare una depressurizzazione della bombola, *prima* di procedere alla bonifica, è pertanto fondamentale. Ciò per garantire il trasferimento integrale dell'eventuale fase liquida e di grossa parte di quella gassosa ad un sistema di accumulo. E' da notare che tale modifica oltre ad aumentare la

sicurezza dell'impianto consente di conseguire anche notevoli vantaggi sia nel ridurre l'impatto ambientale dell'attività che di risparmio energetico (riutilizzo del gas recuperato per alimentare il bruciatore del termocombustore).

Per poter valutare la riduzione del rischio, si può far riferimento ad una semplice comparazione fatta con riferimento ad un bidone di 10 kg del volume totale di circa 25 litri, contenente 1 kg di fase liquida.

Un kg di gpl residuo in fase liquida genera al momento della decompressione circa 550 litri di gas in condizioni normali (20°C, 1 bar). Inoltre in equilibrio con la fase liquida, è presente una fase gassosa ad una pressione pari alla tensione di vapore alla temperatura interna presente nel bidone. Con semplici calcoli è possibile valutare in circa 650 litri il volume di gas che fuoriesce (ipotizzando una pressione interna di 5 bar). Se invece ipotizzammo di aver effettuato il completo trasferimento della fase liquida e depressurizzato il bidone ad es. a 2 bar, si può stimare in circa 50 litri il volume di gas emanato durante lo svalvolamento. La portata di aria di diluizione nei due casi si riduce di più di dieci volte. Non solo, in presenza di solo gas, la pressione all'interno del bidone scende più rapidamente e quindi il transitorio ha durata maggiore.

Il risultato è che l'aria di diluizione oltre che ad essere inferiore come quantità è anche più efficace, perché i fenomeni di miscelazione aria/gas avvengono con tempi più lunghi.

Il potenziale meccanismo di generazione di cariche elettrostatiche nel reparto di svalvolamento risulta pure drasticamente ridimensionato nelle nuove modalità operative.

La sequenza della bonifica dei bidoni è stata pertanto modificata prevedendo come primo passaggio la depressurizzazione dei bidoni ed il trasferimento della fase liquida eventualmente contenuta ad un sistema di due serbatoi polmone. La depressione necessaria per il trasferimento è garantita da un piccolo compressore che aspira il gas da un primo serbatoio e lo trasferisce nel secondo: in tal modo la pressione nel primo recipiente è mantenuta ad un valore basso (prossimo a quello atmosferico) favorendo l'operazione di trasferimento e la depressurizzazione di una serie di bidoni (cinque o sei a seconda della grandezza), collegati capovolti ad un collettore di aspirazione (foto n. 20).

Ciascun bidone è collegato al collettore mediante pinze ad innesto rapido, del tipo omologato per operazioni di travaso di gpl, provviste di un attacco di serraggio, meccanico o pneumatico, che assicura la tenuta del collegamento ed esclude il distacco accidentale. Il collettore è provvisto di un piccolo polmone (di alcuni litri) per stabilizzare la pressione di aspirazione e visualizzarla all'operatore, attraverso un manometro di affidabilità adeguata (a bagno di glicerina). La linea è inoltre provvista di un indicatore di passaggio di liquido, del tipo ad accoppiamento magnetico. In tal modo, l'operatore può riscontrare l'effettivo trasferimento della fase liquida e la depressurizzazione del gruppo di bidoni.

La portata del compressore è di circa 100 litri/min, con funzionamento continuo. Viene quindi assicurato il mantenimento della depressione nel serbatoio di aspirazione (foto n. 21).



Foto n. 20. Nuova unità per il trasferimento della fase liquida e depressurizzazione dei bidoni.



Foto n. 21. Serbatoi di accumulo e compressore di aspirazione del gpl contenuto nei bidoni.

Consensi di basso livello nei serbatoi e di bassa pressione nel collettore di aspirazione sono necessari perché l'operatore possa attuare lo svuotamento dei bidoni, la cui durata può essere stimata con semplici considerazioni teoriche in circa un minuto. Al ritmo di avanzamento del sistema di bonifica, l'operatore ha circa tre minuti di tempo per far ribaltare il gruppo di cinque o sei bidoni (con un unico movimento meccanizzato), attaccare le pinze, aprire le valvole, attendere lo svuotamento, richiudere le valvole e riportare i bidoni in posizione verticale sulla rulliera per il successivo avanzamento verso la cabina di

svalvolamento. Apposite valvole di intercettazione manuale consentono di isolare il collettore (ed i serbatoi ad esso collegati) in emergenza.

Grazie alla separazione del circuito di aspirazione dei fumi di saldatura (reso indipendente), alle macchine utilizzate per lo svalvolamento e lavaggio dei bidoni nelle nuove condizioni operative viene garantita una portata di aria superiore (di circa il 25%): essendo stati notevolmente ridotti i quantitativi di gas emanati, il rapporto di diluizione risulta notevolmente superiore.

Per quanto riguarda l'impiantistica elettrica, in tale sezione essa è stata ridotta al minimo. Gli azionamenti delle macchine sono di tipo pneumatico. Le uniche apparecchiature alimentate elettricamente sono alcuni fine-corsa, a corredo delle apparecchiature di svuotamento e lavaggio, alimentati in bassa tensione ed esecuzione antideflagrante.

La nuova condotta di collegamento al termocombustore è stata realizzata in materiale metallico, curando il drenaggio delle cariche elettrostatiche (tramite il collegamento a terra di tutte le macchine in zona bonifica) e l'equipotenzialità di tutto il sistema, in modo da minimizzare la possibilità di formazione di scintille all'interno di tali sezioni.

Le distanze di sicurezza interne, esterne e di protezione fra i vari centri di pericolo (zona depressurizzazione bidoni, serbatoi, svalvolamento) sono state fissate in analogia a quanto stabilito in applicazioni similari (normativa di prevenzione incendi per depositi di gpl).

Come ulteriore misura di protezione passiva, intorno alle macchine di svalvolamento e lavaggio, è stato realizzato un muro in cemento armato di schermo, in grado di garantire un'adeguato schermo delle postazioni di lavoro in caso di eventi incidentali (foto n. 22).



Foto n. 22. Muri di schermo delle macchine di svalvolamento e lavaggio dei bidoni.



Foto n. 23. Dettaglio della valvola a clapè posta sul serbatoio D-1.

In ossequio a quanto, con lungimiranza, disposto dal DPR 547/55 è stato installato un sistema di monitoraggio continuo della concentrazione di gpl sia nella zona di svalvolamento che all'interno della tubazione di trasferimento al termocombustore. Sono state previste due soglie di allarme: la prima per una segnalazione all'operatore, la seconda per bloccare la sezione di bonifica dei bidoni. I sensori sono stati installati anche nella zona di raccolta delle acque di lavaggio dei bidoni: in caso di rilevazione della presenza di gpl è previsto il blocco dell'impianto di bonifica e l'arresto delle apparecchiature del depuratore.

In corrispondenza del serbatoio di compensazione dell'impianto di termocombustione, è stata installata una valvola a clapè (foto n. 23). In condizioni normali, per la depressione creata dal ventilatore di aspirazione, tale valvola si mantiene in posizione di chiusura. In caso di malfunzionamento del combustore (arresto del ventilatore principale, blocco delle valvole di inversione del flusso, ecc.), si ha l'arresto del ciclo lavorativo con il blocco delle rulliere deputate all'avanzamento dei bidoni. Un nuovo ventilatore ausiliario posto nei pressi della cabina di svalvolamento permette l'asportazione dell'eventuale gas presente lungo la condotta, con sfogo tramite apertura della valvola a clapè.

5. CONCLUSIONI

Se si può verificare la potenziale formazione di miscele infiammabili in un processo produttivo, allora devono essere prese precauzioni per eliminare tutte le sorgenti di innesco oltre che prevedere idonee misure protettive (barriere e schermi fisici, dispositivi di sfogo delle sovrappressioni e di soppressione del principio di esplosione).

Le "interfacce" fra le varie sezioni dell'impianto devono essere adeguatamente valutate, secondo quanto

peraltro ribadito dal DPR 459/96 (Direttiva Macchine, obblighi dei costruttori) e dal D.Lgs. 626/94 e D.Lgs. 359/99 (obblighi degli utilizzatori). Rispetto alla configurazione iniziale, l'impianto descritto nella relazione era già stato oggetto nei pochi mesi di vita di alcune modifiche, concentrate nella sezione di bonifica e lavaggio dei bidoni e tese per lo più a minimizzare i rilasci in atmosfera di sostanza organiche volatili, causa di numerose segnalazioni e lamentele da parte delle attività limitrofe. Nello specifico, le sezioni erano state collegate direttamente, senza prevedere alcuna cautela di prevenzione delle esplosioni, di rilevazione di concentrazione di potenziali miscele esplodibili all'interno della tubazione di collegamento, ecc.. Oltre a ciò, per unificare in un unico punto le emissioni in atmosfera, alla sezione di termocombustione facevano capo anche i condotti di aspirazione dei fumi di saldatura (introducendo un ulteriore, tecnicamente non necessario, pericolo legato trascinarsi accidentale di scorie incandescenti).

La relazione affronta nel dettaglio le modifiche proposte alla configurazione impiantistica per risolvere le criticità evidenziate dall'analisi dell'incidente, ribadendo la necessità di un approccio interdisciplinare alla sicurezza che coniughi le diverse competenze necessarie per una credibile e consapevole valutazione del rischio.

Si ringrazia la Ditta per la collaborazione dimostrata.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] F. P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworth Heinemann, Vol. 1, pp. 498-505 (1992)
- [2] W. Bartknecht, *Explosions*, Springer-Verlag, (1981)