

TITOLO: SCOPPIO DI RECIPIENTI PORTATILI DI GPL PER ECCESSO DI RIEMPIMENTO. INDAGINI FRATTOGRAFICHE E METALLOGRAFICHE PER LA RICERCA DELLE CAUSE

Autori:

Atzeni C., Sanna U., Spanu N. Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali; Piazza D'Armi I, 09123 Cagliari.

Cadoni L., Orrù F., Conti M.F., Manselli L.; Comando Provinciale Vigili del Fuoco di Sassari, piazza Conte di Moriana 1, 07100 Sassari.

Sommario

Da alcuni anni il Dipartimento dei Vigili del Fuoco insieme al CIG, Comitato Italiano Gas, è impegnato a raccogliere dati statistici riguardanti incidenti relativi a depositi o impianti per GPL, nel tentativo di portare un contributo utile all'attività di prevenzione. La gran parte delle statistiche tuttavia, si sofferma sulle cause esterne, cioè sulle cause che provengono dall'ambiente di installazione, tralasciando il comportamento meccanico del recipiente o dell'impianto.

Nel caso che viene trattato nella memoria, invece, viene posta l'attenzione sulle condizioni di una bombola fino a ricostruire un fenomeno assai preoccupante di cedimento del contenitore per un eccesso di riempimento.

Il reperto di questo studio è una bombola di capacità nominale di 5 Kg. Sul mantello, in associazione ad una evidente bombatura, risulta essersi sviluppata una apertura a T. Nell'ambito della ricerca delle cause dello scoppio, è stata effettuata una indagine macrofrattografica sulle superfici di frattura, evidenziando gli aspetti diagnostici della morfologia ed individuando il probabile punto di innesco della lesione. Gli esami metallografici condotti, hanno consentito di riconoscere i tipi e le caratteristiche degli acciai utilizzati nella realizzazione della bombola, i particolari della tecnica di saldatura e di valutare gli aspetti corrosionistici in alcune parti critiche. Il confronto con i dati sui materiali e sulle tecniche realizzative definite dalle Norme, ha permesso di affermare che il reperto era correttamente realizzato. Da tali analisi sono scaturite le osservazioni sulle cause della sovrappressione interna che hanno portato all'apertura del mantello della bombola e quindi al rilascio nell'ambiente del suo contenuto.

La memoria si propone pertanto di riportare un panorama il più possibile esaustivo circa le conoscenze attuali nel campo degli incidenti riguardanti recipienti portatili di GPL, insieme alla trattazione di un caso reale che ha coinvolto un intero nucleo familiare che abitava nel centro storico della città di Sassari. Nello stesso tempo la memoria evidenzia la presenza di fenomeni di riempimento abusivo di recipienti per GPL, notoriamente diffusi, per i quali è necessario uno sforzo congiunto di Istituzioni ed Associazioni per migliorare la conoscenza del fenomeno e sensibilizzare tutti i cittadini ai rischi derivanti da certe pratiche abusive.

Introduzione

Nella casistica degli incidenti domestici assume particolare rilevanza, per l'elevato numero e per la gravità delle conseguenze, lo scoppio dei recipienti portatili per GPL. La cronaca quotidiana, purtroppo, porta frequentemente all'attenzione casi di scoppio di bombole di GPL associati a gravi danni alle persone ed agli edifici.

L'indagine successiva a tali eventi è spesso derivata da necessità di ordine giudiziario, mentre risultano attualmente carenti o parziali gli studi sulle cause di tali eventi, studi che potrebbero costituire un punto di riferimento utile anche per l'attività normativa.

Nel seguito, comunque, verranno riportate le statistiche attualmente disponibili, utili per cercare di comprendere un fenomeno che ogni anno determina decine di morti e centinaia di feriti. Si ricava un quadro dal quale emerge la scarsa informazione della maggior parte degli utenti circa i rischi legati all'utilizzo del GPL, specie quello in bombole. Nei paragrafi successivi, inoltre, viene evidenziato un particolare aspetto del fenomeno legato ai riempimenti abusivi dei recipienti per uso domestico, che quasi nell'indifferenza generale sono in realtà causa di molti eventi incidentali, alcuni con conseguenze gravissime, come nel caso avvenuto in Corso Vittorio Emanuele a Sassari.

Casistica sugli incidenti coinvolgenti bombole di GPL

Negli ultimi anni, lo scenario degli incidenti causati dal GPL, riferito ai recipienti e agli impianti canalizzati, risulta efficacemente monitorato. Numerose iniziative di studio e ricerca propongono annualmente una statistica dei dati relativi ad eventi incidentali sul territorio nazionale. Tra queste le principali sono rappresentate dall'Osservatorio congiunto, tra Comitato Italiano Gas (CIG) e Dipartimento dei Vigili del Fuoco, finalizzato al miglioramento delle conoscenze sul fenomeno e all'individuazione delle migliori strategie preventive. Inoltre un ampio panorama del settore può essere dedotto dal rapporto annuale redatto dal CIG che include oltre alla casistica sugli incidenti da gas in bombole, oggetto del presente studio, anche quella riferita al gas canalizzato. Quest'ultima si avvale del contributo, apportato dal 2001, connesso all'obbligo d'informazione sugli incidenti da gas istituito dall'Autorità Garante.¹

Dalle statistiche dell'ultimo quinquennio emerge un andamento significativo degli incidenti nelle abitazioni private. I dati che emergono da uno studio² del 2003, riportano tali casi al 51% degli incidenti totali e attribuiscono a tale incidenza anche il maggior numero di vittime. La gran parte degli incidenti domestici (circa l'85%), inoltre, riguarda le bombole e non i serbatoi fissi, con circa il 49% di esplosioni.

Nel 2004 la statistica presa a riferimento³ indica un decremento sia degli incidenti totali, da 162 nel 2003 a 139 nel 2004, sia del numero di deceduti (28 nel 2003, 13 nel 2004, mentre risultano in aumento gli infortunati). Si evidenzia però che nel medesimo biennio risultano in riduzione il numero di utenti e di bombole vendute. La maggior parte dei 139 incidenti è avvenuta nei mesi freddi, in particolare: nel primo trimestre circa 60 incidenti (di cui uno mortale con due deceduti) con 114 infortunati nel complesso; nell'ultimo bimestre sono stati registrati 26 incidenti con 55 infortunati e quattro eventi mortali con 4 deceduti. Nel periodo meno freddo - da aprile a ottobre - si sono verificati 53 incidenti con 57 infortunati, di questi 5 mortali con 7 deceduti. Dallo studio emerge anche che una consistente parte, 25 incidenti, sono dovuti ad atti volontari di tipo doloso oppure per tentati suicidi.

I dati del 2005⁴ confermano l'andamento decrescente per quanto riguarda il numero di deceduti, nel totale 7, e degli infortunati 185 rispetto ai 226 del 2004. E' cresciuto però il numero degli incidenti, in tutto 159. Anche nell'anno passato una considerevole quota degli incidenti è avvenuta nei mesi più freddi dell'anno, 58 tra gennaio e marzo, 4 tra novembre e dicembre. Gli altri 60 casi si sono verificati nel periodo "caldo" compreso tra aprile e ottobre. Dei 159 incidenti complessivi 150 sono dovuti agli stoccaggi di GPL per uso domestico. In particolare alle bombole di GPL sono riconducibili 116 casi, ai serbatoi fissi 15 casi ed, infine 19 non sono chiaramente imputabili né allo stoccaggio né alla canalizzazione. I restanti 9 sono da attribuirsi ad incidenti stradali di autocisterne di GPL (6) e vetture alimentate a GPL (3) (figura 1).

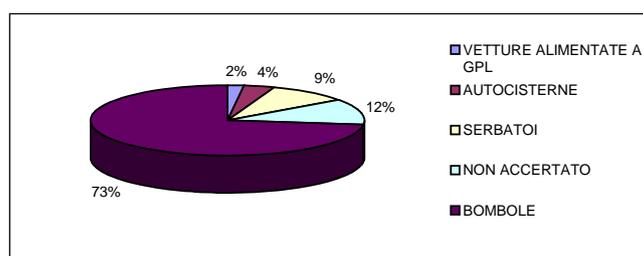


Figura 1 - Incidenti da gas in recipienti - statistica 2005.

Circa le cause degli incidenti domestici, in tutte le annualità oggetto della statistica, si riconfermano le stesse ipotesi riconducibili per la gran parte, alla disattenzione, superficialità e trascuratezza nell'uso dei recipienti e nella loro manutenzione. Ciò è imputabile sia alle trasformazioni del contesto sociale sia all'invecchiamento della popolazione rispetto alla moderna cultura della sicurezza. Un'altra fonte di cause è quella derivante dalle installazioni non conformi alle norme per ciò che riguarda gli apparecchi utilizzatori ma anche per l'inidonea realizzazione delle ventilazioni, delle canne fumarie ecc.

Al fine di evidenziare ulteriori aspetti inerenti alla causa degli eventi incidentali relativi alle bombole, la casistica è stata ricondotta alla seguente classificazione che, sebbene sia mutuata dalle delibere emanate dall'Autorità del settore⁵ per gli incidenti da gas canalizzato, risulta un utile riferimento di analisi anche per i casi qui in esame. Le categorie di incidenti sono state accorpate nel modo seguente:

1. dispersione di gas (volontaria o non);
2. combustione incontrollata in un apparecchio di utilizzo del gas;
3. cattiva combustione in un apparecchio di utilizzo del gas, compresa quella dovuta ad insufficiente aerazione;
4. inadeguata evacuazione dei prodotti della combustione in un apparecchio di utilizzo del gas.

Con riferimento alle categorie indicate sopra, sono stati analizzati i 116 casi di incidenti di bombole di GPL rilevati nel 2005. Ne è risultato che 70 sono consistiti in una dispersione di gas; 30 in una combustione incontrollata in un utilizzatore; 6 casi sono imputabili alle categorie 3 e 4. I rimanenti 10 casi sono stati esclusi dalle quattro categorie in quanto la bombola non è stata origine dell'evento incidentale ma, diversamente, è stata coinvolta in un incendio dovuto ad altre cause.

Un approfondimento dei casi classificati nel gruppo 1, ha inoltre evidenziato che dei 70 eventi censiti 15 sono dovuti a rilasci di GPL dalla tubazione di collegamento tra la bombola e gli utilizzatori, e ulteriori 5 casi sono relativi a perdite dai componenti dell'impianto di collegamento (guarnizioni, riduttori ecc). In questi, l'incidente va evidentemente attribuito all'impianto inefficiente o in cattivo stato. All'errore umano sono invece riferibili 8 casi, nei quali le operazioni di sostituzione della bombola sono state condotte con manovre errate che hanno portato al rilascio del gas con il successivo innesco della miscela combustibile. Sono stati infine riscontrati circa venti casi nei quali la perdita è avvenuta dagli utilizzatori (cucine, stufe ecc.). Per circa 30 eventi non è stato possibile desumere l'origine del rilascio del gas.

In conclusione, dai dati analizzati può desumersi che la maggior parte degli incidenti da gas in bombole non è attribuibile alla bontà costruttiva del recipiente ma, viceversa all'uso e alla manutenzione sia dell'impianto sia degli apparecchi utilizzatori. In tal senso un utile misura preventiva può essere costituita dall'attivazione di una diffusa campagna informativa, per la popolazione, sui rischi connessi all'uso improprio del gas.

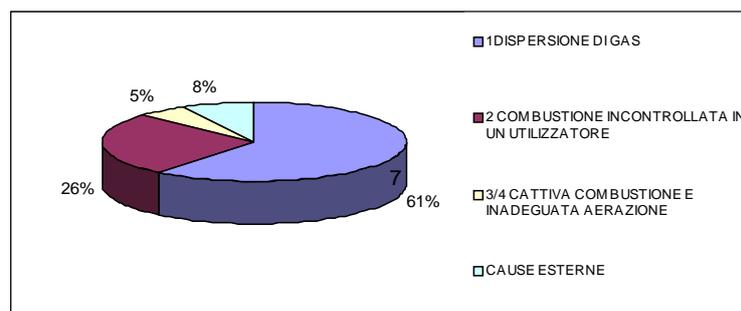


Figura 2 – Categorie degli eventi - statistica 2005.

Si rileva, infine, che non emergono dati riferiti a rilasci di prodotto a seguito di cedimento meccanico dei recipienti, fenomeno del quale ci occuperemo più in dettaglio nei paragrafi successivi.

L'incidente del Corso Vittorio Emanuele a Sassari

Nella serata di domenica 22 maggio 2005, all'interno di un appartamento al terzo piano di un edificio del centro storico di Sassari, si verificavano due fenomeni in successione: lo scoppio di una bombola di GPL da campeggio presente all'interno della cucina e, poco dopo, una violenta deflagrazione, del gas contenuto nella bombola, nella quale rimanevano coinvolti tutti i componenti del nucleo familiare, con gravi danni da ustioni, oltre a traumi di varia natura.

La deflagrazione, che ha causato anche gravi danni all'edificio, ha immediatamente condotto all'ipotesi di un rilascio di gas combustibile. L'esame attento dell'ambiente e delle possibili fonti ha consentito di individuare una bombola da 5 kg che, per motivi da stabilire, è scoppiata rilasciando nell'ambiente il proprio contenuto. La circostanza che la bombola fosse piena è stata successivamente confermata dalle indagini seguite all'incidente. Dalle testimonianze risulta anche che è trascorso un certo lasso di tempo fra il cedimento del contenitore e l'esplosione, tempo durante il quale il capo famiglia ha portato fuori dall'abitazione la bombola scoppiata, depositandola nel pianerottolo antistante l'appartamento, in una posizione abbastanza prossima a quella nella quale è stata rinvenuta dopo l'esplosione. Le ustioni gravi riportate da tale persona sono sicuramente da attribuire all'imbibizione, del corpo e degli abiti, di prodotto durante l'evaporazione, prodotto che si è incendiato dopo l'innesco della miscela.

Per quanto riguarda il contenitore, si tratta di una bombola di GPL da campeggio da kg 5 che al momento del rinvenimento (figura 31) presentava uno squarcio verso l'esterno a forma di T allargata, completamente vuota e non collegata ad alcun utilizzatore anche se sul *maschio* filettato di uscita gas posto sul volantino di apertura era ancora avvitato il raccordo *femmina* tipico dei regolatori di pressione di 2° stadio utilizzati nelle utenze domestiche.



Figura 3 - La bombola incidentata.

L'ipotesi di un collegamento in atto ad un utilizzatore trovava riscontro nella mattinata successiva all'evento, quando i Vigili del Fuoco, all'altezza del pianerottolo del 3° piano, ritrovavano un fornello da campeggio collegato ad una tubazione gas in polietilene, a sua volta innestata su un regolatore di pressione la cui estremità libera era tranciata di netto e perfettamente combaciante con la sezione interna del raccordo filettato serrato alla bombola. La circostanza del ritrovamento di entrambe le parti della stessa apparecchiatura (bombola e fornello) nel vano scala permette di affermare che le parti si trovavano unite prima dell'esplosione e che sono state separate a seguito del violento urto seguito all'esplosione stessa.

Della bombola in questione non è stato possibile individuare i dati di targa, fatta eccezione per l'anno di fabbricazione, il 1977. Per quanto riguarda la provenienza, le testimonianze rilasciate dopo l'evento non lasciano dubbi: si tratta, infatti, di una bombola prelevata presso un deposito di ferro vecchio e che risultava, a quel momento, certamente vuota. Si tenga conto, al riguardo, che la distribuzione delle bombole di GPL per campeggio avviene normalmente attraverso negozianti autorizzati che possono vendere solo bombole collaudate (la revisione è decennale) generalmente già riempite. Sulle modalità di riempimento, purtroppo, le testimonianze raccolte sono state decisamente discordanti. In realtà non esistono, per quanto si è potuto appurare, stabilimenti in provincia di Sassari che riempiono bombole di quella marca, e pertanto qualunque rivenditore che dovesse fornire un servizio simile dovrebbe spiegare chi e come risulta in grado di caricare dette bombole. Ciò che viceversa, appare evidente è l'esistenza di un mercato sommerso della ricarica di piccole bombole, indirizzato soprattutto agli artigiani che utilizzano strumenti a fiamma, per il quale si effettuano ricariche da bombola piena a

bombola vuota mediante attrezzature artigianali; modalità assolutamente vietata in quanto estremamente pericolosa.

Esiste, inoltre, un'altra possibilità di riempimento, non meno preoccupante della prima, legata ai distributori di GPL per autotrazione: come verrà spiegato nei paragrafi successivi, gestori senza scrupoli riempiono abusivamente bombole di gas, piccole o grandi, contravvenendo sia a precise norme fiscali che a norme di sicurezza, in quanto la procedura di riempimento non consente il controllo del livello del liquido nella bombola, in modo tale che risulta abbastanza facile superare il limite dell'80% fissato per legge. La conseguenza, in ogni caso, è che mentre in origine il prodotto era sicuramente una miscela ricca di butano (con bassa tensione di vapore), con questi tipi di riempimenti si immette una miscela ricca di propano con tensione di vapore più elevata che, pertanto, esercita sul contenitore una maggiore sollecitazione. Inoltre, la possibile situazione di sovrariempimento, che facilmente si determina, può creare gravi rischi legati alle variazioni di temperatura (rischio di sovrappressione e quindi di scoppio).

Nel caso in esame, purtroppo, non si è potuto appurare né con quale prodotto è stata riempita la bombola né esattamente fino a quale livello; si possono tuttavia fare alcune considerazioni che riguardano le caratteristiche strutturali della bombola e le modalità di rottura che possono aiutare ad individuare le cause dello scoppio.

In assenza di fonti di calore esterne, da escludere nel caso in esame, le cause dello scoppio possono ricondursi a due categorie: rottura fragile improvvisa della bombola e cedimento lento per sovrappressione interna causata da un errato riempimento. Al fine di accertare le caratteristiche meccaniche del contenitore e stabilire il tipo di rottura, fragile o duttile, si è pensato di eseguire sul reperito apposite indagini sperimentali.

Indagini di laboratorio per stabilire le cause dello scoppio

E' stata condotta una indagine macrofrattografica sia in microscopia ottica che elettronica sulle superfici di frattura, evidenziando gli aspetti diagnostici della morfologia ed individuando il probabile punto di innesco della lesione. I campioni sui quali sono stati condotti gli esami frattografici e metallografici sono stati prelevati dal lembo destro del mantello, come indicato nella figura 4.

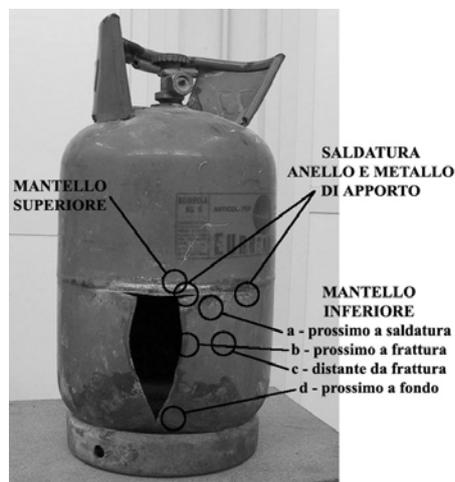


Figura 4 – Punti di prelievo dei campioni e loro denominazione.

L'esame macrofrattografico è stato condotto in stereomicroscopia a fibra ottica (da 5x a 50X) ed ha riguardato entrambi i lembi dell'apertura e la superficie interna del recipiente. La morfologia delle superfici di frattura dei campioni è stata osservata tramite microscopia elettronica a scansione (fino a 1000X). Gli esami metallografici in microscopia ottica per riflessione e le misure di microdurezza Vickers (sotto un carico di 80 grammi, protratto per 10 secondi) sono stati condotti su sezioni lucide, eventualmente sottoposte ad attacco col reattivo Nital per evidenziare i bordi dei grani (esposizione: 5÷10 secondi). I punti della lamiera inferiore resi accessibili dal campionamento hanno uno spessore medio di 1.96 ± 0.17 mm (27 determinazioni) mentre la superiore presenta un valore di 2.53 ± 0.08 mm (9 determinazioni). La differenza è attribuibile anzitutto all'assottigliamento dovuto

alla deformazione plastica in fase di rottura (in qualche punto, non inserito nella media, si ha 1.30 mm), e in parte, probabilmente, all'intenzionale impiego di lamiera diverse tra le due parti: quella superiore sarebbe stata scelta più spessa a causa dell'indebolimento calcolato per la presenza del foro di inserimento della valvola. Per le norme attualmente in vigore (UNI EN 1442) lo spessore di progetto, rapportato alla resistenza di snervamento del materiale ed al tipo di liquido/gas di riempimento (butano o GPL), non può comunque essere inferiore a 1.5 mm.

La morfologia della superficie di frattura è schematicamente riportata nella figura 5.

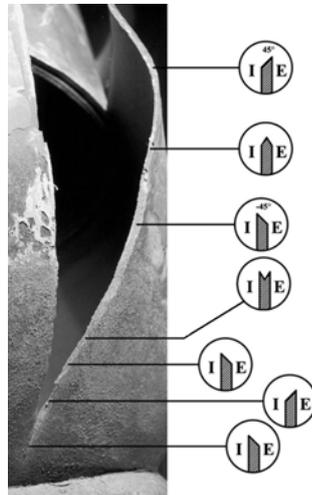


Figura 5 – Andamento del profilo di frattura della lamiera – I: lato interno, E: lato esterno.

L'inversione di pendenza ($\pm 45^\circ$), associato alla posizione della massima bombatura, individua probabilmente il punto di inizio della frattura (figura 6) (Grover 1963, Kauczor 1979). La causa diretta dell'inversione potrebbe essere associata alla differenza dei campi tensionali e deformativi indotti sulla lamiera dalle differenti condizioni di vincolo, costituite verso l'alto dall'anello di saldatura e verso il basso dai punti di saldatura del piede. L'osservazione del tratto terminale inferiore comprendente l'apice, mostra una nuova inversione di pendenza, stavolta associata alla deformazione di "contro"-bombatura che caratterizza questa parte del mantello.



Figura 6 – Zona di inversione della pendenza del lembo di frattura.

L'osservazione al microscopio elettronico, a maggiori ingrandimenti e con una migliore profondità di campo, ha mostrato che l'intera superficie esaminata presenta la tipica morfologia della frattura di tipo duttile. Sono evidenti le striature dovute alla deformazione ed alla coalescenza dei microvuoti originati dallo stress disgiungente i grani e ad ingrandimenti ancora maggiori, si possono osservare le tipiche fossette, "dimples" (figura 7).

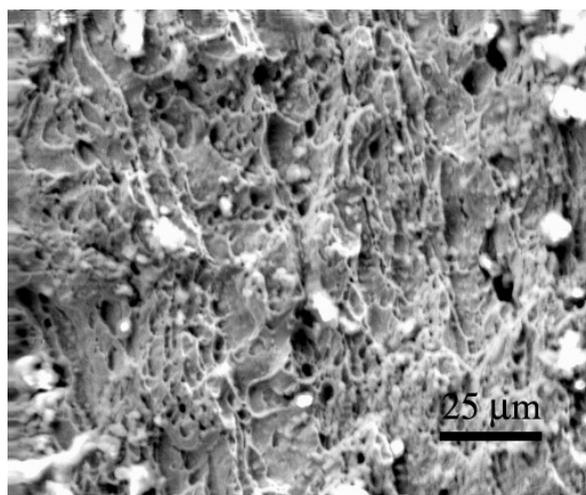


Figura 7 – Le “fossette” tipiche della superficie interessata alla frattura duttile.

Di un certo interesse per la valutazione della qualità del metallo e della costruzione è considerare quanto richiede la vigente norma UNI EN 1442 (2002), riguardo ai risultati dei test di scoppio sotto pressione idraulica (non minore di 50 bar) dei serbatoi di GPL: a–“nessuna frammentazione”, b–“la frattura principale non deve presentare segni di fragilità, cioè i bordi della frattura non devono essere radiali ma devono presentarsi ad angolo rispetto ad un piano diametrale e mostrare una riduzione di area su tutto lo spessore”, c–“la frattura non deve rivelare alcun difetto visibile del metallo, per esempio sfogliatura”. Chiaramente la frattura in esame, seppure derivante da un evento incidentale e non dal test normalizzato, rispetterebbe questi requisiti a dimostrazione dell’adeguatezza dell’acciaio impiegato.

Su scala microscopica, lo sforzo meccanico si concentra su singolarità, quali l’interfaccia tra la matrice metallica e le inclusioni non-metalliche inevitabilmente presenti, i bordi di grano, i grani di seconde fasi, e porta al distacco tra le due fasi; il metallo, duttile, tende quindi a deformarsi per scorrimento originando la tipica forma delle fossette con il perimetro lacerato, che una volta che si uniscono danno origine alla caratteristica morfologia spugnosa della superficie di frattura. In assenza di cavità superficiali o di separazioni intergranulari derivanti da processi corrosivi o da intagli meccanici, una locale concentrazione di inclusioni può agire come concentratore della tensione e quindi costituire il punto di innesco di una micro-frattura; successivamente le tensioni si concentrano sugli apici della micro-frattura e ne promuovono la progressiva estensione.

La tabella 1 riporta i risultati conseguiti tramite l’esame metallografico.

Tabella 1 – Caratteristiche microstrutturali e stima della resistenza a trazione.

Campione	Struttura	Dimensione grano ASTM	% C, stimato	Durezza, kg/mm ²	Resistenza, N/mm ²	
Mantello inferiore	a – prossimo a saldatura	Ferrite	8-9	0.16-0.20	190 ± 10	610
	b – prossimo a frattura	Ferrite	(stirati)	0.16-0.20	180 ± 15	570
	c – distante da frattura	Ferrite	8-9	0.16-0.20	180 ± 12	570
	d – prossimo a fondo	Ferrite	8-9	0.16-0.20	150 ± 7	480
Mantello superiore	Ferrite+Perlite	9	0.20-0.22	210 ± 12	660	
Saldatura	anello	Ferrite+Perlite	9-10	0.20-0.22	170 ± 11	540
	apporto	Ferrite	(colonnari)	-	167 ± 10	530

La figura 8 mostra, a titolo di esempio, la tipica sezione metallografica della lamiera superiore; la perlite appare come componente grigio tra i grani chiari di ferrite.

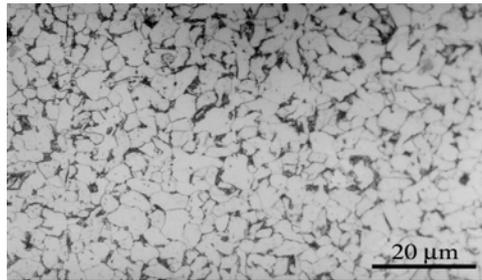


Figura 8 – Microstruttura della lamiera superiore: grani di ferrite (chiari, prevalenti) e di perlite (grigi).

I valori di resistenza a trazione presentati nella tabella 1 sono stati stimati dai dati sperimentali di microdurezza, facendo uso delle tabelle di conversione riportate nell'ASM Metals Handbook (1961). La relazione tra le due grandezze fisiche andrebbe accuratamente tarata sugli specifici acciai in esame, pertanto la procedura da noi adottata è legittima ma approssimata: i valori riportati debbono pertanto essere intesi come indicativi ma non necessariamente precisi. Considerando congiuntamente la stima della percentuale di carbonio effettuata dall'osservazione metallografica si può comunque ragionevolmente affermare che gli acciai utilizzati per la realizzazione del mantello della bombola in esame sono comparabili con i tipi denominati P355NB/P310NB, esplicitamente previsti dalla normativa vigente per la costruzione di recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per GPL (UNI EN 1442 e UNI EN 10120); i due acciai citati hanno: $C = 0.2 \pm 0.02\%$, resistenza a trazione = $510 \div 620 / 460 \div 550 \text{ N/mm}^2$, minimo carico unitario di snervamento superiore = $355 / 310 \text{ N/mm}^2$.

Pur costruito con materiali, progetto e lavorazione adeguati è evidente che un aspetto fondamentale per la valutazione della sicurezza del contenitore è il suo stato di corrosione. Manifestazioni di corrosione sono state riscontrate sul campione prelevato solo in prossimità del fondo, in corrispondenza della superficie esterna (figura 9). Essa decorre in modo generalizzato e localmente con approfondimenti "a ulcera". Lo spessore interessato non è superiore a pochi centesimi di millimetro. Il carattere del processo corrosivo, anche in accordo alla struttura dell'acciaio (a basso tenore di carbonio, senza particolari elementi di lega) non assume forma intergranulare/penetrante. Sul campione considerato è presumibile che la corrosione, per entità e forma riscontrate, non abbia ancora assunto aspetto preoccupante per normali condizioni di esercizio e soprattutto non pare in grado di portare a cedimenti improvvisi.

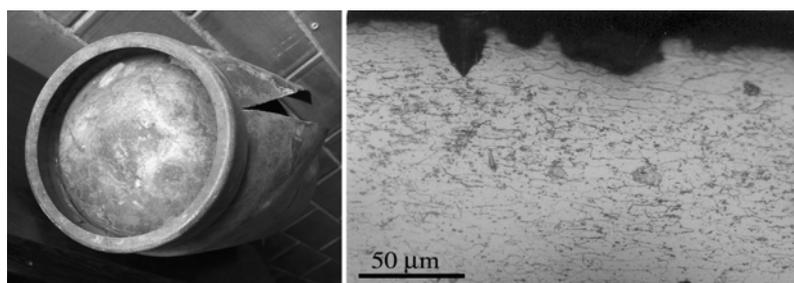


Figura 9 – A sinistra il fondo del contenitore; a destra manifestazioni di corrosione sulla sezione del campione prossimo al fondo; la superficie esterna è in alto.

Le norme UNI EN 1439 "Procedure di verifica prima, durante e dopo il riempimento" (1997) e UNI EN 1440 "Riqualificazione periodica" (1996) forniscono precise indicazioni per la valutazione, visiva, dello stato di corrosione dei recipienti portatili per GPL, che il reperto in esame sarebbe probabilmente stato in grado di ottemperare. Le indagini sperimentali portano quindi alle seguenti conclusioni:

- il recipiente risulta realizzato con leghe metalliche e tecniche di lavorazione adeguate;
- non sono prevedibili fenomeni di invecchiamento o di fatica tali da comportare rotture impreviste in normali condizioni di esercizio;

- non si sono riscontrati segni di danneggiamenti antecedenti all'incidente che possano aver innescato la frattura in normali condizioni di esercizio;
- la frattura si è sviluppata sulla parte della costruzione maggiormente deformabile ed il punto di avvio è probabilmente associato alla massima bombatura; la lesione è quindi cresciuta sia verso il basso, dove però è stata bloccata dall'irrigidimento costituito dai punti di saldatura, sia verso l'alto dove incontrando la saldatura circonferenziale si è diramata simmetricamente inducendo il parziale distacco dei lembi;
- in assenza di segni di danni da urti e di sollecitazione da riscaldamento, escludendo reazioni dovute alla presenza o all'ingresso di particolari specie chimiche, la causa della rottura può essere quindi legata ad una sovrappressione interna; a sua volta tale sovrappressione può essere connessa ad un sovrariempimento di liquido ed allo sbalzo di temperatura ed eventualmente al fatto che tale liquido non fosse costituito esclusivamente da butano.

In sostanza si escludono difetti costruttivi del metallo tali da poter innescare un fenomeno di frattura mentre gli effetti dell'ossidazione visibili nella parte inferiore sono risultati assolutamente ininfluenti sulla resistenza del materiale.

Studio della dilatazione del prodotto e ricostruzione della dinamica dell'incidente

Una delle note proprietà del GPL è di variare il suo volume specifico all'aumentare della temperatura del liquido. Questa proprietà impone alle società di distribuzione del gas di non riempire completamente i contenitori (bidoni, serbatoi ecc.) ma di mantenere un franco di sicurezza. Il franco generalmente è pari a circa il 20% del volume del contenitore e permette di evitare che un accidentale aumento della temperatura esterna provochi un incremento del volume della fase liquida, tale da occupare l'intera capacità geometrica del contenitore.

Nel caso di riempimenti abusivi questa accortezza non viene assicurata ed incrementi della temperatura possono portare al collasso del mantello. Si intende di seguito determinare i valori di differenza di temperatura che portano al riempimento completo del contenitore di GPL in fase liquida e poi ai valori di sovrappressione originati da un aumento di temperatura in un contenitore con GPL in fase liquida. Successivamente sarà determinato il valore di temperatura tale per cui il contenitore di raggiunga la fase di snervamento e la conseguente rottura.

Calcolo del "colmo" a seguito di dilatazione termica del liquido:

Per un liquido generico, contenuto in un recipiente, vale la relazione

$$\Delta T = \frac{100 - R}{R \beta} \quad [1]$$

dove:

β = coefficiente di espansione volumica media [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

R = grado di riempimento percentuale iniziale che porta il liquido ad occupare l'intero volume del contenitore per un salto di temperatura ΔT .

Per determinare il valore del coefficiente β vengono utilizzati due approcci: il primo si ottiene mediando i valori sperimentali⁶ validi per il propano e il butano, il secondo utilizzando l'Appendice B della Norma UNI EN 1439/1997 (da cui $\beta = 1.67 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

I valori di β nel primo approccio sono:

Temperatura estiva $15.56 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 60.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\beta = 3.99 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (propano) $\beta = 2.27 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (butano)

Temperatura inverno - $1.11 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 21.11 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\beta = 2.82 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (propano) $\beta = 1.84 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (butano)

nel secondo approccio invece:

$\beta = 1.67 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Esempio

Per un grado di riempimento pari a $R = 95\%$ alla temperatura di riempimento nel periodo estivo si ottengono per i due metodi:

1° Approccio $\Delta T = 13.19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (propano) $\Delta T = 23.19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (butano)

2° Approccio $\Delta T = 31.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

per un grado di riempimento di $R = 99\%$, con la stessa temperatura di riempimento, otteniamo:

1° Approccio $\Delta T = 2.53 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (propano) $\Delta T = 4.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (butano)

2° Approccio $\Delta T = 6.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Per un grado di riempimento pari a $R = 95\%$ nel periodo invernale si ottiene:

1° Approccio $\Delta T = 18.66 \text{ }^\circ\text{C}$ (propano) $\Delta T = 28.6 \text{ }^\circ\text{C}$ (butano)

2° Approccio $\Delta T = 31.5 \text{ }^\circ\text{C}$

per un grado di riempimento di $R = 99\%$, con la stessa temperatura di riempimento, otteniamo:

1° Approccio $\Delta T = 3.58 \text{ }^\circ\text{C}$ (propano) $\Delta T = 5.49 \text{ }^\circ\text{C}$ (butano)

2° Approccio $\Delta T = 6.6 \text{ }^\circ\text{C}$

Determinazione della sovrappressione indotta nel contenitore su un recipiente riempito al 100% .

Per un liquido contenuto in un contenitore cilindrico la variazione di volume è pari a:

$$\Delta P = \frac{e^{\Delta T \beta} - e^{3\Delta T \alpha}}{\frac{d_0}{t_0 E_T} \left(\frac{5}{4} - \nu \right) + k} \quad [2]$$

dove:

k = coefficiente di comprimibilità del liquido;

α = coefficiente di comprimibilità del metallo;

β = coefficiente di dilatazione termica del metallo;

ν = coefficiente di Poisson;

E = modulo di Young;

d_0 = diametro interno contenitore;

t_0 = spessore del mantello.

Il valore di k per il GPL (C3 e C4) è difficilmente reperibile in letteratura, si assume quindi un valore estrapolato dai valori degli alcani e degli omologhi superiori pari a $2 \times 10^{-9} \text{ [Pa}^{-1}\text{]}$.⁷

Esempio

Si calcoli il valore della sovrappressione originata in un recipiente di GPL riempito abusivamente con $R = 100\%$ con la variazione $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ con il materiale costituente la bombola avente le seguenti caratteristiche:

$E = 206 \text{ GPa}$; $\nu = 0.3$; $d_0 = 232 \text{ mm}$; $t_0 = 2.5 \text{ mm}$; $k = 2 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$; $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

Sostituendo i valori elencati nella [2] si ottiene:

$\beta = 3.99 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (propano periodo estivo) $\Delta P = 16.32 \text{ Bar}$

$\beta = 1.84 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (butano periodo invernale) $\Delta P = 7.44 \text{ Bar}$

$\beta = 1.67 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (norme UNI) $\Delta P = 6.74 \text{ Bar}$

Si noti che risulta sufficiente un incremento di un solo $^\circ\text{C}$ per avere una sovrappressione di circa una decina di Bar, rispetto alla tensione di vapore.

Calcolo della sollecitazione a trazione sul metallo

Si utilizza la relazione:

$$\sigma = P (1/2d_0 / t_0) \quad [3]$$

Secondo quanto dettato dalla norma UNI EN 1442/2002, assumendo un valore di snervamento pari all'85% della tensione ultima di 600 MPa, si ottiene, con le grandezze geometriche del precedente esempio, un valore di pressione di scoppio di 11 MPa (110 bar), valore nettamente superiore alle pressioni di collaudo delle bombole.

Esempio

Con tale valore di pressione, dalla formula [2] si ottiene:

$\Delta T = 6.7 \text{ [}^\circ\text{C]}$ con $\beta = 3.99 \times 10^{-3} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$ (propano periodo estivo)

$\Delta T = 14.6 \text{ [}^\circ\text{C]}$ con $\beta = 1.84 \times 10^{-3} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$ (butano periodo invernale)

$\Delta T = 16.1 \text{ [}^\circ\text{C]}$ con $\beta = 1.67 \times 10^{-3} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$ (norme UNI)

Quindi con le ipotesi poste, su una bombola completamente riempita di GPL allo stato liquido basta un innalzamento di temperatura di circa una decina di $^\circ\text{C}$ perché l'acciaio del contenitore raggiunga lo snervamento con conseguente rottura del contenitore.

Quanto avvenuto la sera del 22 maggio 2005 a Sassari può quindi essere spiegato nel modo seguente. La bombola di GPL da campeggio viene riempita abusivamente quasi al 100% della sua capacità, presumibilmente nel periodo invernale. L'incremento di temperatura relativo al cambio di stagione, probabilmente nell'ordine di una decina di gradi, risulta comunque sufficiente a determinare un graduale aumento della pressione interna sino allo scoppio del contenitore.

Il riempimento abusivo delle bombole: alcune osservazioni conclusive

Il caso trattato nei paragrafi precedenti evidenzia a quali gravi conseguenze si può andare incontro con il riempimento abusivo delle bombole di GPL. Gli elementi di criticità di tale prassi, purtroppo assai diffusa, possono essere così riassunti:

- Mancato collaudo periodico del recipiente in pressione: la bombola riempita abusivamente esce dal circuito dei rivenditori che periodicamente, attraverso la rete delle aziende autorizzate, provvedono al collaudo previsto dalla legislazione vigente.
- Mancata verifica del grado di riempimento: il riempimento eseguito con mezzi di fortuna o artigianali non consente di individuare il livello di riempimento che non dovrebbe essere superiore all'80%.
- Probabilità di rilascio di gas durante il riempimento: talvolta i mezzi artigianali utilizzati non garantiscono la tenuta e si può quindi verificare la formazione di miscele esplosive nell'intorno del punto di travaso.
- Mancata verifica della tenuta del recipiente: presso gli impianti di riempimento autorizzati si provvede alla verifica, prima dell'immissione sul mercato, della tenuta della bombola per individuare eventuali perdite.

Uno dei luoghi dove purtroppo avviene con maggior frequenza il riempimento abusivo delle bombole di GPL è nei distributori stradali. Il Dipartimento dei Vigili del fuoco già dagli anni cinquanta⁸ ha esplicitamente proibito tale pratica, specificando che oltre alla frode fiscale tale operazione costituiva un grave rischio per gli operatori e per la popolazione. Recentemente il Dipartimento ha richiamato tale divieto, ribadendo la pericolosità di qualsiasi tipo di riempimento abusivo^{9 10} e sollecitando un'azione congiunta di tutte le forze dell'ordine per una attività capillare di vigilanza e prevenzione.¹¹

Attualmente non esiste una statistica che contempli i casi di riempimento illecito di bombole e le conseguenze dovute all'attuazione di tale prassi. Ciò scaturisce principalmente a due fattori: i casi di scoppio dovuti a riempimento abusivo creano una nube di gas che innescata provoca un incendio. Spesso lo scoppio di una bombola viene ritenuto conseguenza e non causa dell'evento. Nei casi in cui la nube non trova innesco, l'evento sfugge alle rilevazioni statistiche per mancata segnalazione ai Vigili del Fuoco. Allo stesso tempo, una chiave di lettura diversa degli accadimenti riportati dalla cronaca consentirebbe di intuire che le esplosioni di gas possono essere, almeno in parte, riconducibili al collasso della bombola piuttosto che a rilasci accidentali.

Il riempimento abusivo delle bombole di GPL è un fenomeno sommerso e poco conosciuto ma purtroppo abbastanza diffuso. Per individuare le cause degli eventuali scoppi conseguenti al sovrariempimento risultano particolarmente utili le indagini sperimentali sul reperto, sia metallografiche che frattografiche.

L'azione di contrasto per ridurre la diffusione del fenomeno, può essere sviluppata con una efficace campagna informativa sui i pericoli derivanti dai riempimenti abusivi delle bombole, alla quale dovrà aggiungersi l'indispensabile azione sul territorio delle Forze dell'ordine.

Ringraziamenti

Si ringraziano per la cortese collaborazione l'Ufficio relazioni esterne del Dipartimento dei Vigili del Fuoco, il Comando Provinciale della Guardia di Finanza di Sassari, il Comitato Italiano Gas, Liquigas S.p.a. Filiale Sardegna e Servizio Sicurezza Salute Ambiente, Butangas S.p.a. stabilimento Porto Torres.

Riferimenti

American Society for Metals (ASM), Metals Handbook, 8th ed., vol. 1, Metals Park-Ohio, pag. 1234, 1961.

ASM Committee of Fractography by Electron Microscopy, Interpretation of scanning electro microscope fractographs, Metals Handbook, 8th ed., vol. 10, Metals Park-Ohio, pag. 64-68.

Grover H., Mechanical and metallurgical causes of failure, ASM-Metals Engineering Quarterly, pagg. 1-8, february 1963.

Kauczor E., Pressure vessel from a high-pressure vibratory autoclave burst by explosion, ASM- Case histories in failure analysis, Metals Park-Ohio, pag. 412, 1961.

Martinsen W.E., Johnson D.W., Terrel W.F., BLEVEs: their causes, effects and prevention, Hydrocarbon Processing, pagg. 141-148, november 1986.

Prugh R.W., Quantify BLEVE Hazards, Chemical Engineering Progress, pagg. 66-72, february 1991.

Sofronas T., Pressure bulup in a 'blocked-in pipe. Liquid thermal expansion can rupture pipes, Hydrocarbon Processing, pag. 111, october 2005.

UNI EN 10120, Lamiere e nastri di acciaio per bombole saldate per gas, 1998.

UNI EN 1439, Recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per gas di petrolio liquefatto (GPL). Procedure di verifica prima, durante e dopo il riempimento, 1997.

UNI EN 1440, Recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per gas di petrolio liquefatto (GPL). Riquilificazione periodica, 1997.

UNI EN 1442, Recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per gas di petrolio liquefatto (GPL). Progettazione e costruzione, 2002.

¹ L'art.26 della Deliberazione n.236/2000 dell'Autorità per l'Energia elettrica e il Gas (AEEG) dispone, l'obbligo per il distributore di informare il Comitato Italiano Gas relativamente a questo tipo di incidenti. La comunicazione viene effettuata secondo una modulistica predisposta che consente di individuare informazioni utili sull'entità e il tipo di incidente.

² Alocci G., Restuccia N., Buonpane L., "Banca dati: strumento di conoscenza" in *Obiettivo Sicurezza* n.7/2003

³ Gruppo di lavoro ad hoc "Statistica incidenti da gas combustibile", Comitato italiano Gas, Incidenti da gas combustibile in Italia anno 2004. Si specifica che il documento riporta la statistica degli incidenti costruita in base ai dati forniti dalle Aziende del Gas, dalla Assogasliquidi per il gas in bombole e/o piccoli serbatoi; dal Ministero dell'Interno - Dipartimento dei Vigili del Fuoco e, infine dalla Stampa.

⁴ Elaborazioni sui dati grezzi forniti dall'osservatorio dei Vigili del Fuoco con Assoliquidi.

⁵ Art.28 Delibera AEEG 29 settembre 2004, n.168, "Testo integrato delle disposizioni dell'autorità per l'energia elettrica e il gas in materia di qualità dei servizi di distribuzione misura e vendita del gas", pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 245 del 18/10/2004 - supplemento ordinario n.158.

⁶ Handbook Propane – Butane Gases

⁷ CRC Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Company, Cleveland Ohio, 50° edizione, F12-F13, 1970

⁸ Circolare M.I. 17 febbraio 1958 n. 8 "Riempimento estemporaneo di recipienti a pressione di GPL per usi domestici e simili"

⁹ Lettera Circolare M.I. 7 marzo 2003 "Riempimento illecito di bombole di gas di petrolio liquefatto"

¹⁰ Circolare M.I. 12 aprile 1988 n. 7 "Utilizzo illecito del gas di petrolio liquefatto"

¹¹ Sarno M., Quintabà L., Cappelli E. "Nel mirino dei vigili del fuoco i distributori abusivi di GPL per auto", in *Antincendio* luglio 2001.