

**Convegno Nazionale**

**VALUTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO  
VGR 2006**

*Pisa, Ottobre 2006*

**TRASPORTO DI CARBURANTI SU STRADA:  
STUDIO DELLA VALVOLA DI AEREAZIONE  
E SICUREZZA**

**Ing. L. Tarantolo\*, Ing. F. Pilo°, Prof. B. Atzori<sup>^</sup>, A. Zanardo<sup>§</sup>**

\*Dipartimento di Ingegneria Meccanica – Padova University  
Padova, Veneto (Italy)  
*lucatarantolo@hotmail.it*

° Dipartimento dei Vigili del Fuoco  
Venezia, Veneto (Italy)  
*francpil@libero.it*

<sup>^</sup> Dipartimento di Ingegneria Meccanica – Padova University  
Padova, Veneto (Italy)

° Dipartimento dei Vigili del Fuoco  
Venezia, Veneto (Italy)

## **INDICE**

## **INDICE**

## **SOMMARIO**

### **INTRODUZIONE**

- 1. IL TRASPORTO DI CARBURANTI**
- 2. L'ACCORDO A.D.R.**
- 3. LE AUTOCISTERNE E LORO IMPIANTO**
- 4. LA VALVOLA DI AERAZIONE E SICUREZZA**
- 5. RIBALTAMENTO DI AUTOCISTERNE E MALFUNZIONAMENTI DELLA VALVOLA  
DI AERAZIONE E SICUREZZA**
- 6. ANALISI DELLA VALVOLA IN CONDIZIONI DI RIBALTAMENTO**
- 7. TEST DELLA VALVOLA DI AERAZIONE E SICUREZZA**
- 8. POSSIBILI SVILUPPI**
- 9. CONCLUSIONI**

### **BIBLIOGRAFIA**

## SOMMARIO

Il ribaltamento di cisterne che trasportano carburanti su strada pone delle problematiche quali il pericolo di incendio, l'inquinamento che può derivare dalle perdite di prodotto ma soprattutto i danni economici e i costi al sistema produttivo e sociale a causa della chiusura per molte ore del tratto stradale interessato. Viste le frequenti perdite di prodotto dalle valvole di aerazione e sicurezza delle cisterne incidentate, i Vigili del Fuoco di Venezia hanno proposto uno studio per approfondirne le cause di malfunzionamento.

Carburanti come gasolio e benzina sono classificati come sostanze infiammabili dall'A.D.R., normativa a cui si fa riferimento in questo settore, e sono trasportati dalle cosiddette cisterne "atmosferiche", progettate per resistere a pressioni relative inferiori a 0.5 bar.

Ogni scompartimento del loro serbatoio è dotato di una valvola di aerazione e sicurezza, montata sul coperchio del passo d'uomo, che ha 5 funzioni: provvedere alla normale aerazione sfogando i vapori (a 70mbar) che si creano durante il trasporto, fornire un ulteriore sfogo di sicurezza se la pressione supera i 200-250mbar, impedire depressioni interne oltre i 10mbar, bloccare l'aerazione se la cisterna si inclina oltre i 30° rispetto alla verticale, impedire ad eventuali fiamme di propagarsi all'interno del serbatoio.

Si è visto che alcune cisterne ribaltate a 90°, a seguito di un incidente, perdevano prodotto da tali dispositivi, che dovrebbero invece provvedere alla tenuta del liquido contenuto nel serbatoio anche in tali situazioni.

Una simulazione al computer ha evidenziato che, in caso di ribaltamento, il modello virtuale della valvola apre l'otturatore di sicurezza per sfogare il picco di pressione raggiunto quando il serbatoio colpisce il terreno. Terminato l'effetto dinamico dell'impatto, la molla dell'otturatore di sicurezza vince il peso del liquido contenuto all'interno dello scompartimento, garantendone quindi la tenuta. Tale risultato è ottenibile anche con la prova del *drop test* previsto dalla UNI EN 13317 e UNI EN 14595.

L'analisi FEM e le indagini svolte precedentemente sulle valvole incidentate escludono il cedimento strutturale. La mancata chiusura dell'otturatore di sicurezza dopo l'urto risulta l'ipotesi di malfunzionamento più accreditata.

È stato quindi progettato e costruito un banco di prova che permette di valutare il funzionamento di tale otturatore per inclinazioni oltre i 30°. Testando 13 valvole, sia nuove che usate, si è visto che, oltre al comportamento comune di non mantenere il valore di taratura al variare dell'inclinazione, le valvole usate presentano evidenti depositi olefinici sulla guida dell'otturatore di sicurezza. Tali depositi, che provengono dalla normale aerazione, possono contrastare in parte l'azione di chiusura della valvola dopo l'apertura, compromettendone quindi la tenuta.

Una manutenzione più rigorosa, effettuata ad intervalli più ristretti rispetto a quelli previsti dalla normativa (che sono triennali), assieme ad una diversa scelta dei vincoli e della massa dell'otturatore di sicurezza ne garantirebbero un funzionamento più efficiente per tutte le inclinazioni, e quindi, anche in condizioni di ribaltamento della cisterna.

## INTRODUZIONE

Il trasporto di carburanti tramite autocisterne è esposto a tutti i pericoli derivanti dalla circolazione su strada. Nell'ambito degli idrocarburi come la benzina e il gasolio, gli incidenti come il ribaltamento di autocisterne comportano danni economici, ambientali e disagi notevoli per la circolazione. Negli ultimi anni si sono verificati dei ribaltamenti in cui le perdite di prodotto provenivano dalle valvole di aerazione e sicurezza. Allo scopo di approfondire le cause di tali malfunzionamenti, i Vigili del Fuoco di Venezia hanno proposto all'Università di Padova uno studio su questo tipo di valvole nell'interesse della sicurezza stradale e della prevenzione dagli incendi e dall'inquinamento. Le finalità di questo lavoro sono di effettuare uno studio sulla valvola di aerazione e sicurezza attraverso una iniziale raccolta di informazioni degli impianti che riguardano il trasporto di carburanti su strada, una successiva modellizzazione della valvola in situazioni di ribaltamento e infine una valutazione sperimentale, con prove, delle possibili cause che possono dare luogo a malfunzionamenti.

### 1. IL TRASPORTO DI CARBURANTI SU STRADA

I combustibili per autotrazione usati in Italia sono quasi tutti di origine petrolifera e si suddividono in benzine, gasoli per autotrazione, GPL, metano, kerosene. Il trasporto del carburante su autocisterne prevede una serie di procedure e sistemi finalizzati all'efficienza del trasporto, alla garanzia dell'effettiva quantità

trasportata e alla sicurezza. A causa della natura infiammabile, i carburanti vengono classificati come merce pericolosa e il loro trasporto su strada è pertanto regolamentato dall'A.D.R.

## 2. L'ACCORDO A.D.R.

A.D.R. è l'acronimo di Accord Dangereuses Route, sintesi di "*Accord europeen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route*", cioè l'accordo europeo relativo ai trasporti internazionali di merci pericolose su strada. Si occupa della classificazione delle sostanze pericolose e fornisce le prescrizioni sulla progettazione, costruzione degli impianti che ne gestiscono il trasporto.

La classificazione di una sostanza pericolosa è rappresentata da due parametri:

- la classe è indicata da un numero di una o due cifre, tra cui è sempre interposto un punto e indica il pericolo primario della sostanza.

- un ordinale che è costituito da un numero che indica l'appartenenza ad un raggruppamento omogeneo per caratteristiche chimico fisiche o per pericoli di natura secondaria

Ogni materia, poi, oltre ad essere ricondotta ad una classe ed al relativo ordinale, è anche individuata attraverso un duplice codice identificativo che si legge all'esterno del veicolo poiché apposto sui pannelli di pericolo. Il primo codice è costituito da due o tre cifre poste nella parte superiore del pannello e prende il nome di Numero di Kemler: lo scopo è quello di indicare la tipologia di pericolo.

Il secondo codice, indicato come "UN number" oppure ONU, è costituito da 4 cifre e individua in modo inequivocabile ogni sostanza (o gruppi di sostanze affini per proprietà e tipo di pericolo).

Il trasporto di merce pericolosa deve essere segnalato con appositi cartelli rettangolari, di colore arancio, collocati sul relativo contenitore e che indicano chiaramente il numero Kemler e il codice ONU.

La tipologia del contenitore e del mezzo di trasporto varia in funzione della natura della merce, delle modalità di stoccaggio e di distribuzione e anche dal livello di pericolosità.

Il gruppo di imballaggio da utilizzare per il trasporto dipende dalla pericolosità della materia trasportata.

I liquidi infiammabili nella normativa sono indicati con la classe 3, e comprendono le sostanze che a 50°C hanno una pressione di vapore massima di 300kPa e non sono completamente gassose a 20°C e alla pressione standard di 101,3 kPa, con un punto di infiammabilità definito all'interno di un certo intervallo.

La benzina ha un punto di infiammabilità inferiore ai 0°C (vedi tab.2.1), ha codice ONU 1203 e numero Kemler 33 (materia molto infiammabile); poiché il punto di ebollizione è superiore ai 35°C ma il punto di infiammabilità è inferiore ai 23°C il gruppo di imballaggio è II.

Il gasolio, con punto di infiammabilità superiore ai 61°C ma inferiore ai 100°C, ha codice ONU 1202 e numero Kemler 30, con gruppo di imballaggio III.

Tabella 2.1 – Classificazione ADR della benzina e del gasolio

n. ONU	Nome e designazione chimica della materia	Classe	Codice di classificazione	Gruppo di imballaggio	Grado massimo di riempimento	Densità	Etichetta	Numero di pericolo
1203	Benzina per motori di autoveicoli	3	F1	II	96	0,72	3	33
1202	Carburante Diesel o Gasolio o Olio da riscaldamento leggero	3	F1	III	97	0,865	3	30

Il decreto ministeriale dell'8 agosto 1980 stabilisce le norme di progettazione ed approvazione delle cisterne e particolari caratteristiche ed accessori dei veicoli cisterna da adibire al trasporto su strada di materie pericolose che presentano pericolo di incendio.

Nel 2000 è entrato in vigore il D.M. 21 gennaio 2000 n.107 che limita le emissioni dei vapori di idrocarburi nell'ambiente, obbligando pertanto gli impianti di caricamento delle raffinerie e gli impianti di distribuzione ad avere un sistema di recupero dei vapori.

Di particolare interesse ai fini di questa tesi è l'indicazione della presenza delle valvole di aerazione nei paragrafi A.D.R. citati:

*“6.8.2.2.3. Le cisterne che non sono chiuse ermeticamente possono essere equipaggiate con valvole di depressione per evitare una inammissibile depressione interna; queste valvole di depressione devono essere tarate per aprirsi al valore della depressione per la quale la cisterna è progettata [...]”*

*“6.8.2.2.6. Le cisterne destinate al trasporto di materie liquide la cui pressione di vapore a 50°C non è superiore a 110kPa (1,1bar) (pressione assoluta), devono essere provviste di un dispositivo d'aerazione e di un dispositivo atto ad impedire che il contenuto si spanda fuori se la cisterna si rovescia[...]”*

Un altro aspetto fondamentale nell'ambito delle cisterne sono i controlli periodici. Nella sezione 6.8.2.2. è indicato che

*“si deve procedere ad una prova di tenuta del serbatoio con il suo equipaggiamento e ad una verifica del buon funzionamento di tutti gli equipaggiamenti almeno ogni tre anni. [...] Per le cisterne destinate al trasporto di liquidi, qualora sia ottenuta mediante un gas, la prova di tenuta deve essere effettuata con una pressione almeno uguale al 25% della pressione massima di servizio. In ogni caso essa non deve essere inferiore a 20kPa (pressione manometrica). Per le cisterne munite di un sistema di ventilazione ed un dispositivo di sicurezza per impedire la fuoriuscita del contenuto nel caso di ribaltamento della cisterna, la pressione di prova di tenuta è uguale alla pressione statica della materia di riempimento. La prova di tenuta deve essere effettuata separatamente su ciascuno scomparto dei serbatoi scompartimentati.”*

### **3. LE AUTOCISTERNE E LORO IMPIANTO**

I materiali utilizzati per la costruzione delle cisterne e degli elementi di servizio devono essere compatibili con le sostanze che vengono trasportate. Nel caso di trasporto di benzina e gasolio si utilizzano gli acciai inossidabili e si fa largo uso delle leghe di alluminio: l'elevata resistenza alla corrosione e la bassa densità di quest'ultimo sono compatibili con l'esigenza di garantire la tenuta nel tempo degli elementi di servizio e contemporaneamente l'alleggerimento delle strutture di trasporto. L'ottimizzazione logistica del trasporto punta, infatti, a massimizzare la quantità di carburante trasportata dalla singola autocisterna, che però non può superare un peso massimo di 44 tonnellate (comprensivo di motrice e semirimorchio).

Le autocisterne vengono caricate in raffineria/deposito attraverso impianti dedicati, con un sistema computerizzato che permette di selezionare la quantità esatta da caricare. Terminato il caricamento, il trasportatore riceve un documento che attesta la quantità di carburante prelevata e le procedure comportamentali di sicurezza, relative al prodotto caricato, e può uscire dall'impianto per andare a rifornire le catene di distribuzione dislocate nel territorio. Le compagnie di distribuzione di carburante sono molteplici e il trasporto può essere gestito dalla compagnia stessa oppure affidato a una azienda esterna.

Il veicolo-cisterna consiste in un serbatoio vincolato ad una struttura autoportante. Le autocisterne che trasportano carburanti normalmente vengono definite “cisterne atmosferiche” dato che hanno una pressione di prova (vedi capitolo 2) molto bassa (inferiore a 0.5 bar). I semirimorchi hanno una lunghezza massima complessiva di circa 11m, una massa a vuoto massima di circa 6 tonnellate e una capacità geometrica massima di 45000 litri.

La sezione può essere ellittica o policentrica, favorendo quindi la stabilità del semirimorchio poiché ne abbassa il baricentro rispetto ad una sezione circolare. Lo spessore di parete varia a seconda del tipo di trasporto e delle pressioni: nel caso del trasporto di carburanti liquidi come benzina e gasolio su veicoli in alluminio lo spessore è maggiore di 5mm.

L'interno della cisterna può consistere in uno o più scompartimenti divisi da paratie stagne, e spesso gli scompartimenti più voluminosi sono provvisti anche di diaframmi frangiflutto a tutta sezione.

Poiché non è possibile immettere in atmosfera i vapori di combustibile durante le fasi di carico e scarico, tutte le cisterne sono dotate di un impianto di recupero dei vapori, denominato ciclo chiuso. A scopo di protezione del fasciame della cisterna da elevate sovrappressioni o depressioni interne, l'equipaggiamento prevede anche dispositivi di sicurezza come le valvole di aerazione.

Esistono due tipologie di cisterne: le cisterne volumetriche e chilolitriche.

Nelle cisterne volumetriche, che stanno gradualmente sostituendo quelle chilolitriche, il conteggio dei litri di combustibile scaricato è affidato alle due testate meccaniche contaltri. In questo modo è possibile scaricare anche solo una frazione di ogni serbatoio, escludendo di fatto l'errore derivante dall'aumento o dalla diminuzione di temperatura, e quindi di volume di liquido, che avviene tra la fase di caricamento del veicolo cisterna e la distribuzione.

Ogni scompartimento è dotato di una valvola di fondo, una sonda ottica inferiore, e di un passo d'uomo per l'ispezione posto sulla parte superiore.

Tale apertura è la sede del coperchio passo d'uomo, che può essere ellittico o circolare, ed è assicurato alla cisterna tramite tiranti o anello elastico. Il materiale di costruzione è lega di alluminio. E' provvisto di almeno:

- una bocca di carico da 10", generalmente con chiusura rapida
- una bocca di carico da 3"
- una valvola di aerazione e sicurezza
- una sonda superiore con indicatore di massimo livello, collegata con l'impianto elettrico
- una valvola per il recupero dei vapori, denominata valvola del ciclo chiuso

Tutte le valvole di recupero dei vapori sono collegate ad un'unica condotta, che in fase di carico o svuotamento è collegata ad un apposito impianto. Le valvole di fondo sono dotate di un'entrata per tubo da 4" che le collega alle valvole seletttrici di prodotto. L'apertura per il caricamento o lo svuotamento e la chiusura sono comandate in modo pneumatico.

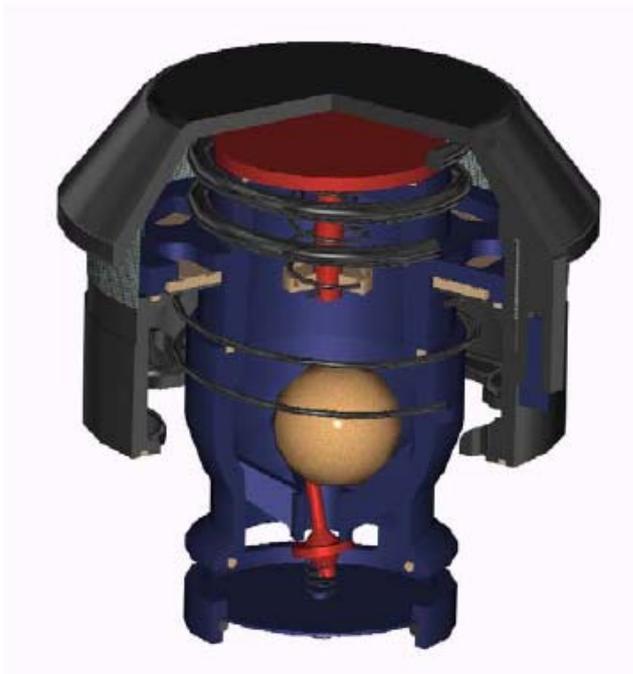
Le valvole seletttrici di prodotto, anch'esse a comando pneumatico, mettono in comunicazione gli scompartimenti con una delle due testate meccaniche contaltri (una dedicata alla benzina, l'altra al gasolio). Nelle cisterne chilolitriche lo scarico avviene senza conteggio volumetrico. Gli scompartimenti sono infatti tarati e il livello esatto di liquido contenuto è verificabile tramite un'asta segnata, visibile da un oblò montato sul coperchio passo d'uomo. Per questo motivo l'impianto di una cisterna chilolitrica, analogo a quello della volumetrica per quanto riguarda i dispositivi elettrici e il recupero dei vapori, risulta privo sia delle testate contaltri, sia delle valvole seletttrici. Inoltre le valvole di distribuzione servono sia per il caricamento che per lo scarico.

La baia di carico è un impianto a più corsie, situato accanto al deposito di carburanti, dedicato al caricamento dei veicoli cisterna che trasportano benzina e gasolio. Ogni corsia è provvista di vari bracci di caricamento che vanno collegati, tramite i relativi accoppiatori, alle valvole di distribuzione del veicolo cisterna. Inoltre il sistema è provvisto di un braccio di collegamento per il recupero dei vapori: durante il caricamento, i vapori sono convogliati in un condotto che termina in una camera di decantazione e, successivamente, alle torri di condensazione.

Il caricamento dal basso, oltre a eliminare il problema delle emissioni di vapori di idrocarburi nell'atmosfera, diminuisce il tempo di procedura e aumenta la sicurezza per gli operatori, poiché non devono più salire sopra la cisterna per aprire i coperchi dei passi d'uomo.

Rimane tuttavia un problema: caricare dagli accoppiatori posti sotto il serbatoio implica che, terminata l'operazione, i tubi di carico rimangano pieni di prodotto, contravvenendo in questo modo alla normativa (A.D.R. 4.3.2.3.5). La misurazione durante lo scarico, d'altra parte, richiede invece tubi pieni.

#### 4. LA VALVOLA DI AERAZIONE E SICUREZZA



flussi.

La valvola di aerazione e sicurezza, di cui è mostrato uno spaccato in fig.4.1 è un dispositivo montato sul coperchio passo d'uomo di ogni scompartimento della cisterna. La sua funzione è di proteggere il fasciame della cisterna dalle sollecitazioni derivanti da una pressione interna troppo elevata e da depressioni che si potrebbero manifestare per esempio in fase di scarico. Inoltre, provvede ad impedire perdite di prodotto in caso di ribaltamento.

Con riferimento alla figura, la valvola è realizzata in lega di alluminio e silicio ed è composta da un coperchio solidale col corpo di attacco (in grigio), vincolato al coperchio del passo d'uomo, e da un otturatore principale di sicurezza (in blu), su cui trovano sede anche gli otturatori di aerazione e di antiribaltamento (in rosso).

In tabella 4.1 sono riportate le cinque funzioni della valvola mentre in figura 4.2 è indicata la cinematica degli otturatori e l'andamento dei

Fig.4.1 – Spaccato di una valvola di aerazione e sicurezza

Tabella 4.1 – Funzioni della valvola di aerazione e sicurezza

n.	Funzione	Descrizione
1	Aerazione o Bassa pressione (BP)	Per effetto dell'evaporazione degli idrocarburi contenuti nella cisterna, quando viene raggiunto un determinato valore di pressione (tipicamente 70mbar), la valvola si apre lasciando sfogare in atmosfera.
2	Sicurezza o Alta pressione (AP)	Se la pressione interna relativa supera il valore di sicurezza (200-250mbar), la valvola permette lo sfogo, con una portata massima che può superare i 1000litri al minuto.
3	Depressione (DP)	Un depressione relativa interna, di solito 10mbar, induce l'apertura della valvola facendo entrare aria nella cisterna, eliminando quindi il rischio di collasso del fasciame.
4	Antiribaltamento	Quando l'angolo formato dall'asse della valvola rispetto alla verticale supera un angolo critico, generalmente di 30°, una sfera interna rilascia un otturatore che chiude il collegamento tra la cisterna e l'apertura per bassa pressione. Le funzioni AP e DP rimangono comunque attive.
5	Retina parafiamma	Una retina parafiamma impedisce il propagarsi di un innesco di fiamma all'interno della cisterna.

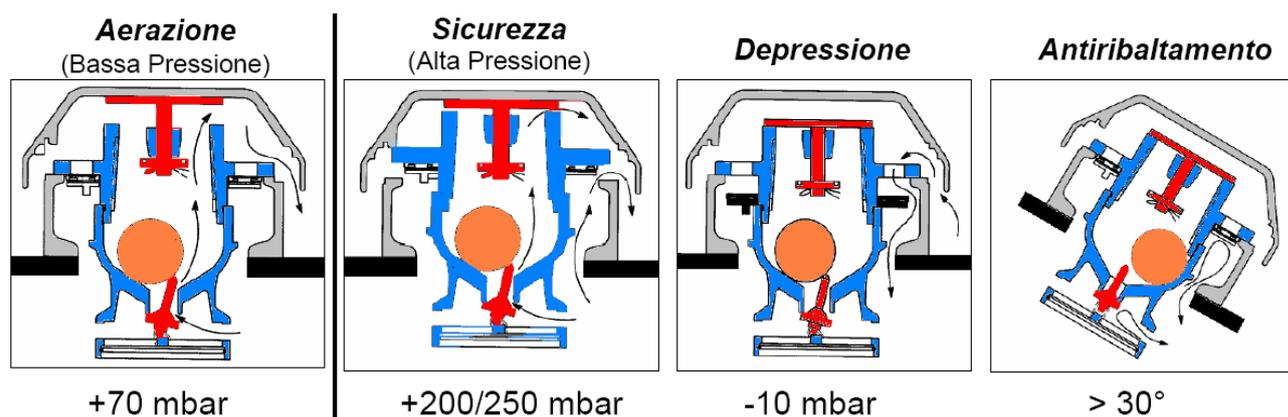


Fig. 4.2 – Andamento dei flussi delle varie funzioni della valvola

La manutenzione della valvola viene effettuata, secondo quanto prescrive la normativa, ogni tre anni, in occasione della revisione triennale dell'interno impianto della cisterna, e consiste nello smontare la valvola e pulire le sedi di tutti gli otturatori. Successivamente si esegue una verifica delle tarature delle molle attraverso una prova al banco.

La valvola viene montata su un attacco flangiato esattamente uguale a quello praticato sulla sua sede nel coperchio passo d'uomo, trovandosi in questo modo all'estremità di un condotto cui è collegato un compressore. L'aria contenuta nel tubo e nella valvola viene messa gradualmente in pressione e quando si raggiungono i 0.07bar la valvola emette un sonoro segno di sfiato dall'otturatore di bassa pressione.

Dopo aver verificato che la funzione di bassa pressione lavora regolarmente, la valvola viene rimossa e collocata tramite un attacco analogo al precedente all'estremità di un condotto contenente acqua. Il tubo è collegato alla rete idrica e la pressione cui è sottoposta la valvola è regolata tramite uno sfiato. Il controllo è effettuato con un manometro analogico. E' altresì possibile regolare l'inclinazione del banco di prova agendo su una leva per verificare l'antiribaltamento. Dopo aver fissato la valvola sull'apposita sede, si aumenta gradualmente la pressione partendo da zero (pressione relativa nulla). L'aria che inizialmente è contenuta all'interno del tubo e della valvola sfiata attraverso l'otturatore di BP, permettendo poi anche all'acqua di uscire. Si nota quindi un leggero trafileamento di liquido che esce dalla valvola. Quando si raggiunge la pressione di 0.2 bar circa si rileva un brusco aumento della portata uscente e una caduta di pressione, segno che il piattello dell'alta pressione si è sollevato. A questo punto si registra il valore massimo raggiunto sul manometro.

Successivamente si diminuisce la pressione fino alla chiusura dell'otturatore AP e si agisce sulla leva che inclina l'asse della valvola oltre l'angolo critico di ribaltamento (30° circa). Il leggero trafileamento termina perché l'otturatore dell'antiribaltamento si chiude.

Si può aumentare di nuovo la pressione oltre i 0.2 bar e verificare che la funzione di alta pressione è attiva. Si fa notare come la verifica effettuata nel modo sopradescritto simuli il funzionamento della valvola in condizioni statiche, con inclinazione massima di 30° rispetto alla verticale, e nulla dice sul suo comportamento quando intervengono eventuali variazioni di temperatura, urti e rovesciamenti della cisterna su cui è montata.

## 5. RIBALTAMENTO DI AUTOCISTERNE E MALFUNZIONAMENTI DELLA VALVOLA DI AERAZIONE E SICUREZZA

Sono stati esaminati, attraverso le informazioni riportate sui fascicoli della Polizia Giudiziaria e sui rapporti dei Vigili del Fuoco, gli incidenti accaduti a

- a) Biancade – Comune di Roncade (TV) il 2 marzo 2004
- b) Megliadino S.Vitale (PD) il 26 aprile 2004
- c) Castelfranco Veneto(TV) il 22 settembre 2004 (fig.5.1)



Fig. 5.1 – Ribaltamento di autocisterna avvenuta a Castelfranco Veneto (22/9/2004) e particolare della perdita proveniente dalla valvola di aerazione e sicurezza.

In tutti e tre i casi esaminati si ha una cisterna che si rovescia di 90° o più, con uno o più scompartimenti pieni di combustibile. La fotografia di fig.5.1 evidenzia il ribaltamento oltre i 90° della cisterna motrice e l'applicazione di un telone in pvc, disposto dai Vigili del Fuoco, per raccogliere il prodotto che viene perso dalle valvole di aerazione e sicurezza collocate sui coperchi passo d'uomo.

Poiché il buon funzionamento dell'autocisterna e di tutto il suo equipaggiamento dovrebbe essere verificato, per legge, in sede della revisione triennale, si può stimare il tempo di esercizio delle valvole testate e ritenute funzionanti. Calcolando il periodo che intercorre tra l'ultimo collaudo (indicato sui documenti del veicolo) e la data dell'incidente si ottiene la tabella 5.1:

Luogo dell'incidente	Data incidente	Ultimo collaudo	Tempo di esercizio
Biancade	2 marzo 2004	dicembre 2002	14 mesi
Megliadino	26 aprile 2004	aprile 2002	24 mesi
Castelfranco Veneto	22 settembre 2004	febbraio 2003	19 mesi

Alcune valvole incidentate sono state esaminate da una azienda costruttrice (la Tecnometal S.r.l. di Ovada) e sottoposte a prove di collaudo. Oltre alle prove al banco, una prova dinamica prevista dallo standard europeo a cui è soggetta la valvola è il "Drop test" menzionato sia dalla EN 13317 che dalla EN 14595. Tale prova è descritta come un test capace di riprodurre le forze dinamiche che intervengono sul coperchio passo d'uomo durante un rovesciamento della cisterna sul fianco. Il risultato di quest'indagine è stato che le valvole incidentate presentavano delle perdite a causa della scarsa manutenzione.

Allo scopo di approfondire le cause di malfunzionamento si è ricorsi ad una simulazione effettuata al calcolatore e ad una prova sperimentale su valvole nuove e usate.

## 6. ANALISI DELLA VALVOLA IN CONDIZIONI DI RIBALTAMENTO

Per ottenere una stima dei carichi e delle sollecitazioni critiche che intervengono sulla valvola durante il rovesciamento di una cisterna ci si basa sulle condizioni di carico previste dalla prova "drop test" prescritta dalle normative UNI EN 13317 e UNI EN 14595. Per lo studio cinematico e dinamico si è utilizzato un modello virtuale costruito su Visual Nastran 4D™.

Il comportamento del liquido all'interno della cisterna durante il ribaltamento dipende da molti fattori, quali la sua densità, la viscosità, la temperatura, l'attrito con le pareti interne, il grado di riempimento, il moto della cisterna, la sua deformazione durante l'urto. La pressione che agisce sulla valvola al momento dell'urto è quindi funzione di tali fattori. Se si ipotizza che la pressione del liquido al momento dell'urto sia funzione solo della decelerazione verticale  $a_{max}$  e della sua densità, si ha che al pressione massima è:

$$p_{max} = p_{vapori} + \rho_{liquido} a_{max} h_{liquido}$$

avendo posto:

$p_{vapori}$	pressione dei vapori intrappolati nella cisterna al momento del rovesciamento.
$\rho_{liquido}$	densità del liquido.
$a_{max}$	accelerazione massima verticale (comprensiva di accelerazione di gravità).
$h_{liquido}$	altezza del pelo libero del liquido rispetto alla posizione della valvola (al momento dell'impatto risulta 1,3m).

La caduta della cisterna influenza il comportamento della valvola, la cui cinematica si può riassumere in cinque punti:

- Inizio rovesciamento: la valvola è chiusa dall'otturatore dell'alta pressione e della bassa pressione se la pressione dei vapori all'interno non supera i 70mbar.
- Al superamento dei 30° la sfera si sposta e libera l'otturatore dell'antiribaltamento che chiude la valvola interna.
- La valvola viene gradualmente lambita dal liquido all'interno e rimane chiusa finché la pressione non supera i 200-250mbar.
- A seguito dell'impatto del serbatoio col terreno, la pressione del liquido all'interno aumenta e l'otturatore dell'alta pressione si apre, scaricando la sovrappressione.
- L'otturatore dell'alta pressione, terminato l'effetto della sovrappressione, si richiude vincendo il peso del liquido contenuto all'interno della cisterna.

Dall'analisi cinematica emergono due possibili cause di malfunzionamento: il cedimento strutturale interno e il mancato ritorno dell'otturatore di sicurezza dopo l'apertura (punto e)

Al momento dell'impatto il carico complessivo ipotizzato sull'attacco flangiato che vincola la valvola al coperchio passo d'uomo comprende (fig.6.1):

- Componenti orizzontali:
  - o Colpo d'ariete del liquido all'interno del serbatoio.
- Componenti verticali:
  - o Decelerazione a causa dell'impatto.

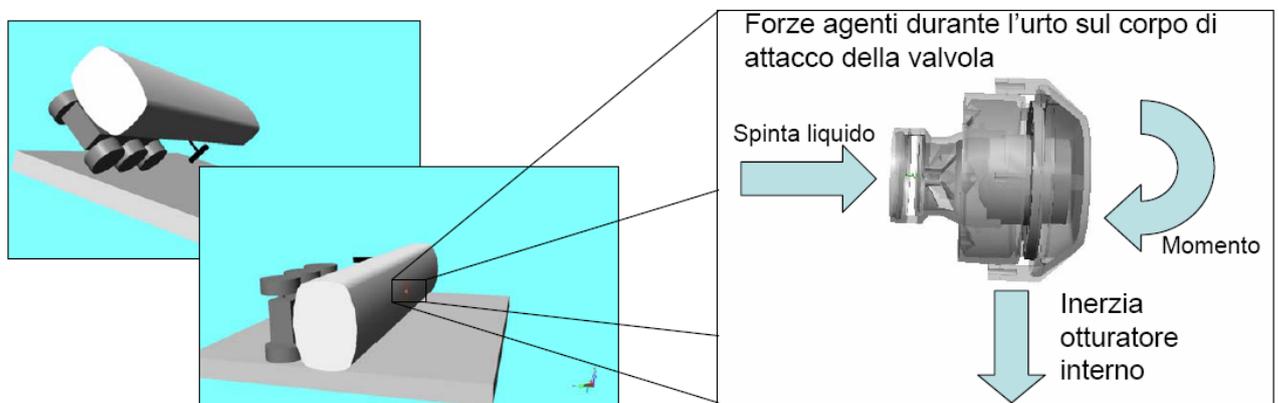


Fig. 6.1 Carico complessivo sulla valvola

La configurazione più gravosa per la struttura nelle ipotesi di carico stabilite risulta essere quella in cui l'otturatore dell'alta pressione è completamente aperto, con antiribaltamento chiuso. Il piede della guida dell'otturatore principale risulta la sezione maggiormente caricata, ma l'analisi FEM (di cui viene mostrata un'immagine in fig.6.2) ha escluso il cedimento strutturale

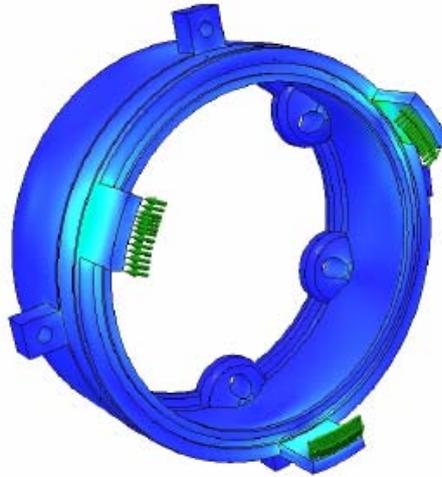


Fig. 6.2 – Analisi strutturale FEM del corpo di attacco

E' stato pertanto necessario rilevare sperimentalmente l'effettiva modalità di apertura dell'otturatore di alta pressione e stabilire quali fossero le condizioni di attrito per ottenere una perdita di prodotto in condizioni di ribaltamento.

**7. TEST DELLA VALVOLA DI AERAZIONE E SICUREZZA**

Per effetto di una forza di attrito  $F_a$  la pressione di apertura è data da  $P_a = k \cdot \Delta x + F_a$  mentre quella di chiusura è  $P_c = k \cdot \Delta x - F_a$ . Ciò significa che l'apertura è ritardata, poiché la forza della molla  $k\Delta x$  viene contrastata dalla forza di attrito. In fase di chiusura si presenta un problema analogo ma con la forza di attrito che agisce in senso opposto.

Sulla base di queste considerazioni si è voluto procedere a una serie di test per verificare attraverso un banco di prova l'apertura e la chiusura di una serie di valvole nuove e usate, per diverse inclinazioni dell'asse della valvola rispetto alla verticale. Ricavando le curve di pressione di apertura e chiusura in funzione dell'inclinazione si può quantificare l'azione dell'attrito nell'interfaccia tra otturatori e guide.

E' stato progettato e costruito in banco di prova, la cui realizzazione e le caratteristiche principali sono riportate in figura 7.1.

**BANCO DI PROVA**

- **Rotazione a 360°** della valvola intorno ad un asse orizzontale
- Test di con **aria e acqua**
- **Regolazione della pressione** per determinare i valori di apertura e di chiusura
- **Misura della pressione** agente con incertezza di 1mbar

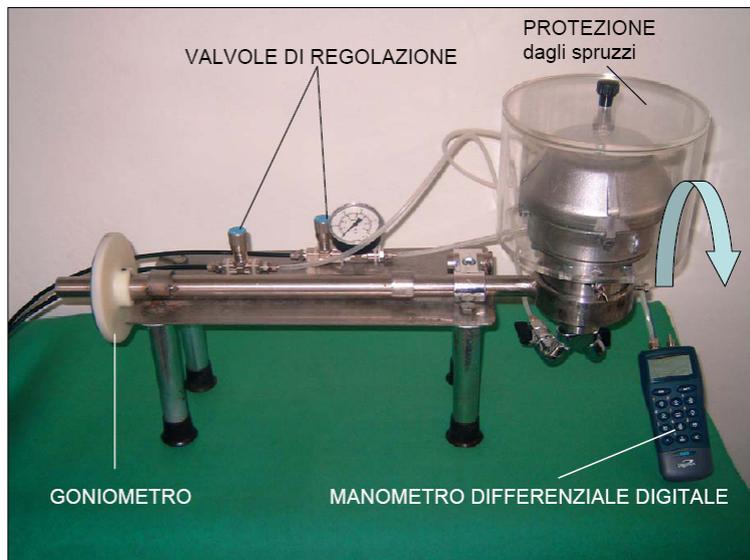


Figura 7.1 – Banco di prova

Agendo sulle due valvole a spillo è stato possibile variare la pressione all'interno del supporto flangiato (camera di pressione) cui è fissata la valvola da testare, a seconda che si volesse utilizzare aria o acqua per la prova. La lettura della pressione è stata effettuata tramite un manometro differenziale digitale collegato alla camera di pressione. Poiché le pressioni che si volevano misurare erano inferiori ai 500mbar e l'incertezza sui valori di apertura dichiarati dal costruttore della valvola erano di 5mbar, si è scelto uno strumento con fondoscala a 1 bar e precisione di 1mbar.

Il complesso valvola-camera di pressione, sostenuto da un tubo orizzontale era libero di ruotare su due appoggi di un angolo  $\alpha$  variabile tra  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . La lettura dell'inclinazione è stata effettuata su un goniometro a due dischi, uno solidale con il tubo e l'altro fisso. Un manometro analogico posto alla mandata della valvola regolatrice per il flusso dell'acqua consentiva di determinare la pressione di rete, che proveniva dall'acquedotto. L'aria proveniva invece da un compressore. Le guarnizioni dei raccordi idraulici del circuito sono state realizzate in teflon e PTFE. Un recipiente trasparente in materiale plastico (non chiuso ermeticamente sulla parte superiore) ha consentito di effettuare le prove con acqua evitando di bagnare la strumentazione quando la valvola apriva durante il test.

Con la valvola montata sul supporto, per inclinazioni inferiori a quella di antiribaltamento, si aumentava gradualmente la pressione relativa da 0 mbar fino all'apertura per bassa pressione (generalmente di 70-80mbar), registrando il valore della pressione indicato sul manometro. Si procedeva quindi all'aumento della pressione fino all'apertura dell'otturatore di alta pressione. Dopo aver annotato i valori di apertura, la pressione è stata gradualmente diminuita fino alla chiusura di entrambi gli otturatori. La pressione di apertura era data dal massimo relativo raggiunto durante la fase di aumento. Quando la valvola sfoga, infatti, la pressione diminuisce. Riducendo gradualmente la pressione di carico si registrava infine il valore di chiusura. Per inclinazioni maggiori di quella di antiribaltamento, la procedura è stata analoga ma coinvolgeva solamente l'otturatore di alta pressione. Eventuali perdite dalla bassa pressione sono state comunque segnalate.

Le misure sono state registrate nella memoria del manometro digitale (provvisto di funzione di rilevamento massimo/minimo) e in seguito sono state inviate al calcolatore che permette la visualizzazione di un grafico inclinazione-pressione.

A partire dalla posizione verticale, ogni assetto è stato caratterizzato da un'inclinazione aumentata di  $15^\circ$  rispetto al precedente. Per ogni assetto sono stati effettuati 5 cicli di apertura e chiusura, quindi ogni punto delle curve deriva dalla media aritmetica di 5 misurazioni.

Le prove sperimentali hanno coinvolto 13 valvole di aerazione e sicurezza; otto di esse erano nuove mentre le altre avevano diversi tempi di esercizio. Il reperimento di valvole già utilizzate è stato subordinato alla disponibilità di trovare autobotti in disuso e personale autorizzato delle officine che doveva smontarle dalla macchina.

Il numero ristretto di campioni e l'alta variabilità dei parametri delle valvole testate (come la pressione di sicurezza e le condizioni di utilizzo) non hanno permesso di riassumere il comportamento delle valvole nuove o di quelle vecchie in una valvola-tipo, tuttavia la lettura dei dati ottenuti ha fornito interessanti indicazioni.

Nella tabella 7.3 sono stati riportati i valori massimi delle pressioni di apertura, i minimi di chiusura e gli scostamenti massimi tra le curve. Nelle valvole nuove il minimo di chiusura è stato per angoli vicini o coincidenti con la configurazione capovolta, mentre per i dispositivi già usati i minimi si sono trovati soprattutto nelle configurazioni di valvola quasi orizzontale.

Valvola n.	Tempo di utilizzo	Alta pressione dichiarata (mbar)	Alta pressione massima rilevata in apertura (mbar)	Alta pressione minima rilevata in chiusura (mbar)	Scostamento massimo (mbar)
1*	Nuova	250	322	-	-
2	Nuova	250	316	244 a $150^\circ$	22 a $60^\circ$
3	Nuova	200	267	203 a $150^\circ$	18 a $60^\circ$
4	Nuova	250	340	275 a $150^\circ$	12 a $150^\circ$
5	Nuova	250	317	249 a $150^\circ$	12 a $90^\circ$
6	Nuova	250	314	254 a $180^\circ$	15 a $60^\circ$
7	Nuova	250	289	230 a $180^\circ$	12 a $150^\circ$
8	Nuova	200	240	180 a $180^\circ$	16 a $75^\circ$
9	> 1 anno	200	216	166 a $105^\circ$	24 a $90^\circ$
10	> 2 anni	200	230	177 a $90^\circ$	44 a $45^\circ$
11	> 1 anno	200	220	176 a $90^\circ$	29 a $0^\circ$
12	> 1 anno	200	228	186 a $90^\circ$	23 a $45^\circ$

13	> 2 anni	200	223	177 a 75°	35 a 0°
----	----------	-----	-----	-----------	---------

Tabella 7.1. Rilevamenti dei massimi dell'alta pressione in apertura, minimi in chiusura e scostamenti massimi tra le curve di apertura e chiusura di tutte le valvole testate.

(\*) La valvola 1 ha l'otturatore della bassa pressione che non garantisce la tenuta e quindi perde costantemente, rendendo impossibile il rilevamento della chiusura.

La figura 7.2 mostra l'andamento delle curve di apertura e chiusura per l'alta pressione di una valvola nuova nelle prove con acqua.

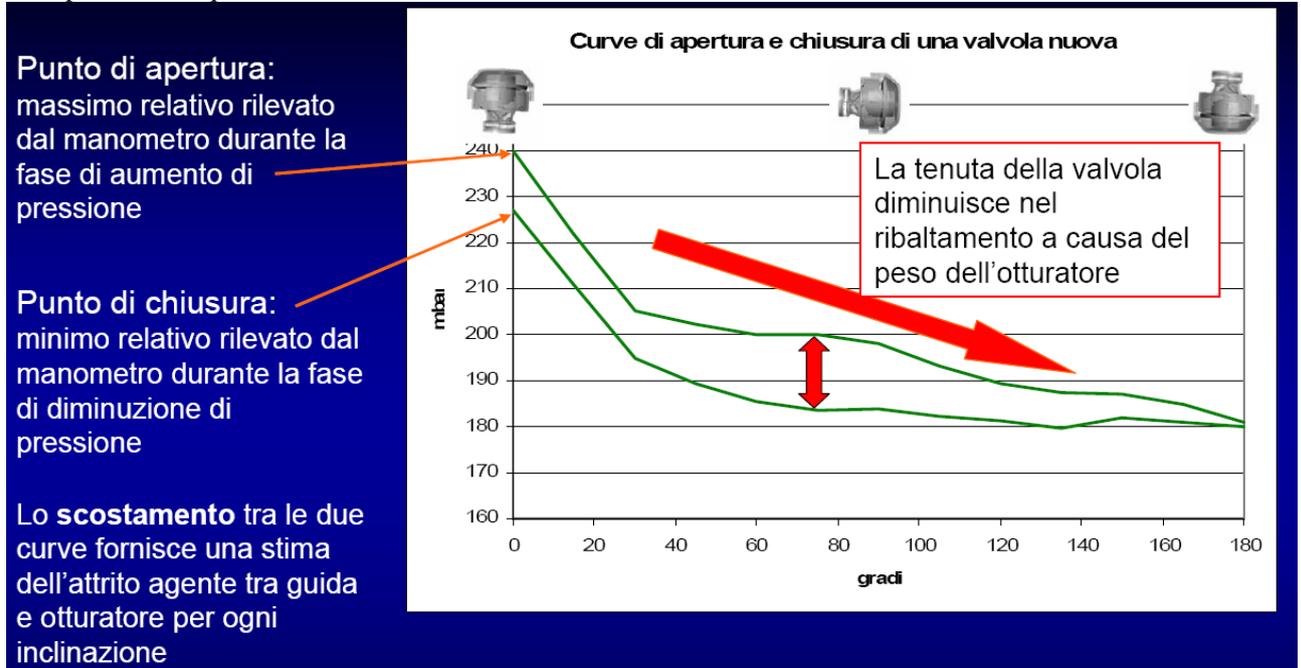


Fig. 7.2 – Andamento delle curve di apertura e chiusura di una valvola nuova

La funzione di antiribaltamento (oltre i 30°) determina l'impedimento dell'apertura per bassa pressione, riducendo quindi il valore dell'apertura per alta pressione. Dalla tabella 7.1 si può notare come lo scostamento massimo sia stato maggiore nelle valvole che avevano già una storia di esercizio. In figura 7.3 è evidente la differenza tra lo stato delle guide e degli otturatori di una valvola nuova rispetto ad una usata da più di due anni.



**DEPOSITI provenienti dall'aerazione**

Fig. 7.3 Confronto tra gli elementi di una valvola nuova e una usata da più di due anni

I depositi olefinici presenti sulle valvole usate provengono dagli sfoghi della funzione di aerazione. Il grafico in fig. 7.4 mostra il confronto tra le curve di apertura e chiusura di tre valvole, una nuova e due con tempo di utilizzo maggiore di un anno e di due anni. L'andamento discendente all'aumentare dell'inclinazione è comune a tutte le valvole testate. Tale fenomeno è dovuto al peso non trascurabile dell'otturatore principale, che ne contrasta l'apertura per valori di  $\alpha$  minori di  $90^\circ$ , mentre per valori maggiori di  $90^\circ$  determina una riduzione della forza della molla. In questo modo il valore massimo dell'alta pressione si ha sempre per  $\alpha=0^\circ$ .

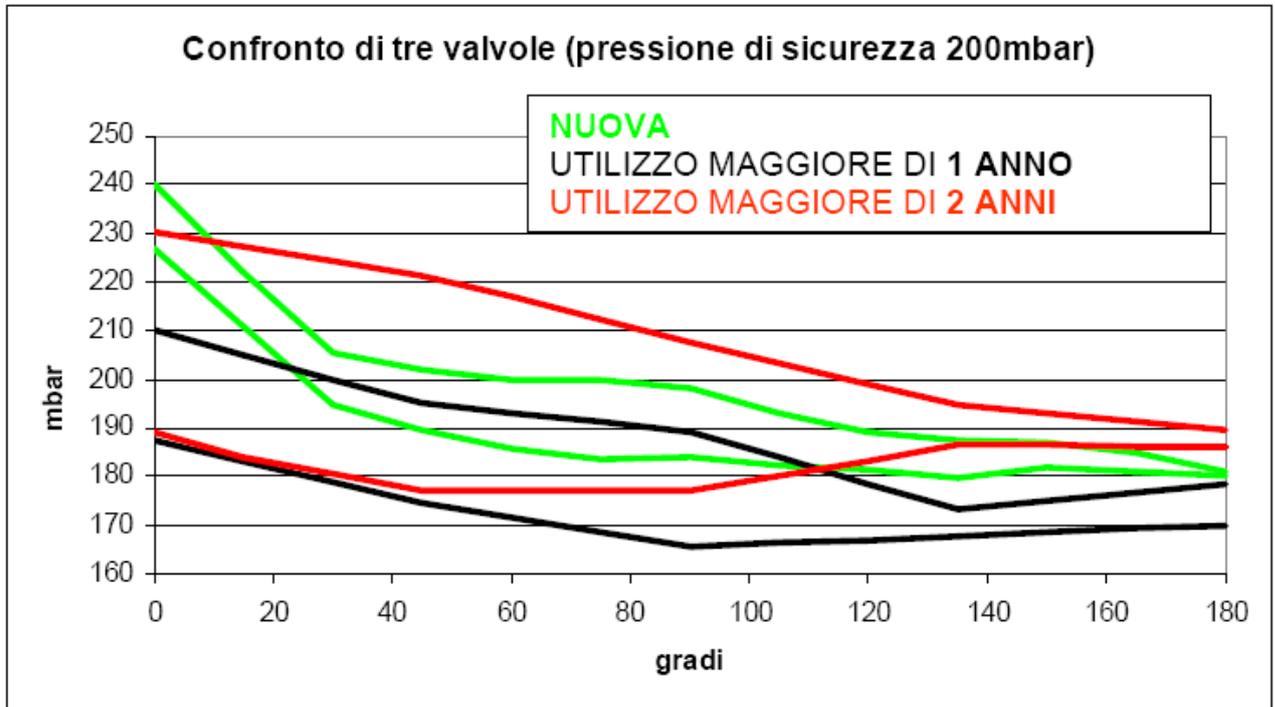


Fig. 7.4 – Confronto tra le curve di apertura e chiusura di due valvole vecchie e una nuova

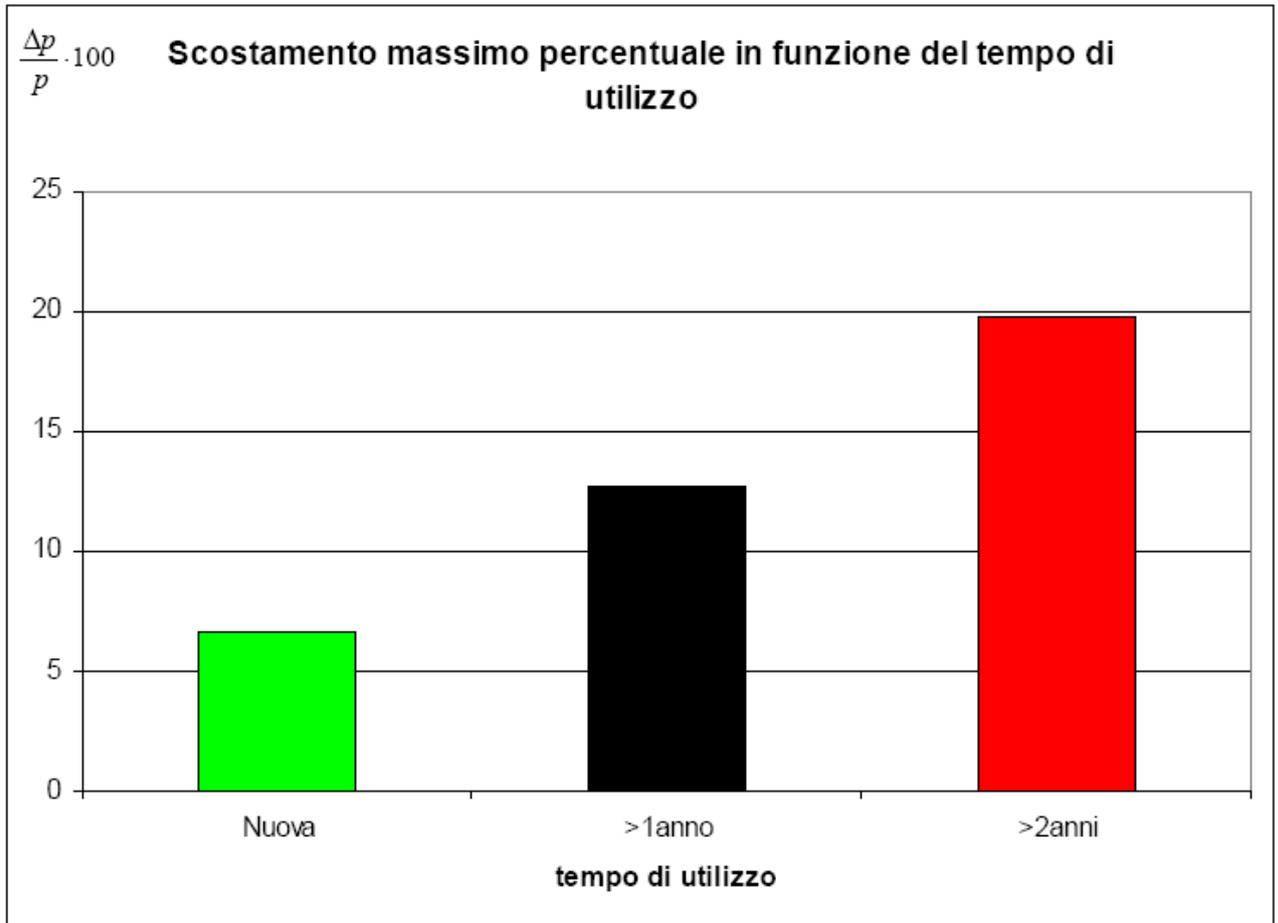


Fig. 7.5 - Medie degli scostamenti massimi relativi in funzione del tempo di utilizzo

Lo scostamento massimo tra le curve di apertura e chiusura fornisce una valutazione qualitativa della forza di attrito che influenza la dinamica dell'otturatore principale, visibile soprattutto nelle valvole che hanno già una storia di esercizio. Il confronto tra le varie valvole ha permesso di constatare l'ampliamento dell'intervallo tra le curve di apertura e chiusura al crescere del tempo di utilizzo (e quindi al peggiorare delle condizioni di pulizia delle sedi degli otturatori). Riportando, infatti, le medie degli scostamenti massimi percentuali tra l'apertura e la chiusura in funzione del tempo di utilizzo (vedi fig. 7.5) si è visto come le valvole usate da più tempo fossero affette da un errore di taratura anche del 20%

Risulta quindi evidente come l'attrito provocato dalle incrostazioni di depositi olefinici contribuisca a modificare i valori di taratura.

La dinamica dell'otturatore principale è influenzata dalla presenza di attrito, dal momento provocato dalla forza peso  $W$  (evidente soprattutto nelle configurazioni di valvola orizzontale) e anche dall'eccentricità non nulla della forza elastica  $F_k$  della molla di alta pressione, comportando uno scostamento anche di 50-60mbar dalle pressioni dichiarate dal costruttore (fig.7.6).

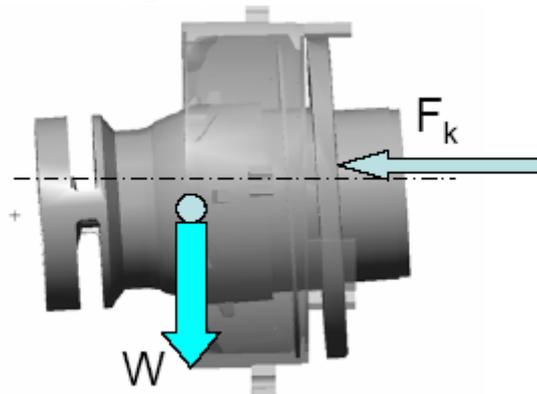


Fig. 7.6 - Schema che mostra l'apertura asimmetrica dell'otturatore principale

Questo comportamento, che viene accentuato all'aumentare del tempo di esercizio, può risultare potenzialmente pericoloso per due aspetti: se la pressione di sfogo aumenta troppo, avvicinandosi alla pressione di calcolo della cisterna, può creare problemi di sollecitazioni dannose sul serbatoio nei casi in cui si abbia un malfunzionamento del sistema di recupero di vapori, ad esempio, durante un caricamento; inoltre, se la valvola di sicurezza ha una curva di chiusura che può scendere al di sotto dei 174mbar, in caso di ribaltamento della cisterna, dopo l'apertura per il picco di pressione, non riesce a contrastare il peso del liquido contenuto nel serbatoio e quindi genera perdite di prodotto.

L'andamento decrescente delle curve, che caratterizza tutte le valvole testate, porta a ritenere che la valvola non sia stata progettata per mantenere la propria taratura in tutte le configurazioni. Infatti, per inclinazioni oltre i 90° i valori di apertura per alta pressione possono scendere anche di 20-30mbar rispetto al valore di progetto, riducendo la tenuta proprio in quelle condizioni in cui la chiusura dovrebbe essere più garantita.

## 8. POSSIBILI SVILUPPI

Diversamente dalla normale verifica a banco, il metodo di prova proposto evidenzia il comportamento degli otturatori in tutte le possibili inclinazioni mentre la successiva rielaborazione dei dati, con la costruzione delle curve di apertura, di chiusura e degli scostamenti, permette di valutare sia lo stato di efficienza della valvola, sia il comportamento dei vari design costruttivi in merito al mantenimento dei valori di taratura in più configurazioni. Tale metodo potrebbe essere perfezionato e rielaborato in funzione di un suo collocamento tra i test ufficiali.

Per quanto riguarda il funzionamento della valvola, per ottenere una differenza minima tra le curve di apertura e chiusura e consentire un'apertura simmetrica dell'otturatore principale è necessario:

- Ridurre il momento della forza peso sull'otturatore principale nella configurazione a 90°
- Modificare il sistema di vincoli dell'otturatore principale: le guide garantiscono la stabilità della posizione relativa dell'otturatore rispetto al corpo di attacco della valvola, ma non vincolano l'orientazione del suo asse, che è pertanto libero di inclinarsi fino a 5° rispetto all'asse della valvola.
- Garantire la posizione di progetto della molla di alta pressione: per assicurare che in fase di montaggio (o a seguito di un urto) la molla non si sposti dalla posizione di progetto, e quindi la forza elastica non risulti eccentrica rispetto alla risultante delle forze di pressione sull'otturatore di alta pressione, sarebbe opportuno praticare una sede per l'estremità superiore della molla sul coperchio della valvola

Per quanto riguarda le funzioni di bassa pressione e di antiribaltamento, la soluzione più logica sarebbe quella di realizzarle in una valvola a parte, materialmente distinta dalla valvola di sicurezza. Lo sfogo dalla bassa pressione, infatti, è molto più frequente di quello dall'alta pressione, specialmente durante il trasporto di benzina. Non avrebbe senso, quindi, esporre le guide e le sedi delle guarnizioni dell'otturatore principale ai depositi dei vapori provenienti dalla normale aerazione del serbatoio, con il rischio di comprometterne la funzionalità. Questa divisione permetterebbe di diminuire il peso dell'otturatore dell'alta pressione e di concentrare i controlli e la manutenzione dove si creano più frequentemente i depositi, salvaguardando al tempo stesso la funzione di valvola di sicurezza. Tuttavia tale soluzione sarebbe in contrasto con i vantaggi economici di avere due valvole in una (come gli elementi di protezione, i tempi di assemblaggio e volume occupato), senza contare il fatto che il coperchio del passo d'uomo attualmente non avrebbe sufficiente spazio per accogliere un ulteriore dispositivo.

Il grafico in fig. risulta indicativo anche per definire un intervallo minimo di manutenzione. Per esempio, assumendo come accettabile uno scostamento massimo del 10%, risulta evidente che le valvole con periodo di utilizzo maggiore di un anno escano dal limite di tolleranza ipotizzato. L'assunzione di tale limite dovrebbe però essere concordata dal costruttore e dalle compagnie petrolifere, o da quelle addette al trasporto di gasolio e benzina, dopo aver testato un numero considerevole di valvole.

## 9. CONCLUSIONI

L'analisi cinematica e dinamica e le precedenti indagini svolte hanno portato a ipotizzare che la causa principale del malfunzionamento della valvola di aerazione e sicurezza fosse l'attrito agente tra l'otturatore principale (di alta pressione) e la relativa guida. Tale attrito è imputabile ai depositi solidificati provenienti dai vapori degli idrocarburi trasportati.

Le prove sperimentali hanno fornito una valida indicazione riguardo all'effetto che hanno questi depositi sull'efficienza della valvola stessa. In particolare, i diversi valori di apertura e chiusura dei dispositivi testati hanno portato a confermare che in casi limite (come quello del ribaltamento) le valvole aventi una pressione di sicurezza di 200mbar non adeguatamente manutenzionate non possano funzionare correttamente.

Il peso e la geometria stessa dell'otturatore principale concorrono a variare la taratura della valvola al variare dell'angolo di inclinazione del suo asse.

L'attuale manutenzione viene effettuata di norma attraverso la verifica al banco in occasione della revisione triennale dell'impianto della cisterna. Tuttavia il costruttore, non ritenendo sufficiente tale procedura ai fini del buon funzionamento, ha inviato delle circolari ai clienti consigliando di controllare e pulire le sedi degli otturatori e delle guarnizioni almeno semestralmente.

A seguito dei risultati sperimentali ottenuti, la manutenzione triennale prescritta dalla normativa appare inadeguata e il controllo semestrale dovrebbe essere quantomeno reso obbligatorio dal costruttore.

Ai fini della sicurezza si ritiene necessario intensificare il controllo delle valvole esistenti per mantenere adeguatamente pulite le guide e le sedi delle guarnizioni degli otturatori .

Inoltre, la modifica del design della valvola deve essere orientata alla riduzione del peso dell'otturatore principale, ad una correzione della posizione del suo baricentro e alla creazione di una guida più efficace. Questo consentirebbe di ridurre la differenza di comportamento del dispositivo al variare dell'inclinazione del suo asse e di ottenere una maggiore garanzia della corretta cinematica dell'otturatore in condizioni critiche (come il ritorno nella propria sede dopo uno sfogo in caso di ribaltamento) e quindi della sua tenuta.

## **BIBLIOGRAFIA**

Bravetti E., Protospataro G., Proli A., Cucchi L., *Accordo A.D.R. e norme complementari sulle merci pericolose 2004*, Egaf.

Cossalter V. (1999) *Meccanica applicata alle macchine*, Padova, Edizioni Progetto.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2002), *UNI EN 13317:2002: Cisterne per il trasporto di materie pericolose – Equipaggiamento di servizio per cisterna – Coperchio passo d'uomo*, Milano.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2005), *UNI EN 14595:2005: Cisterne per il trasporto di merci pericolose - Equipaggiamenti di servizio per cisterne - Sfiato di respirazione per pressione a vuoto*, Milano.

Gaion Armida (2004), *Appunti dalle lezioni di idraulica*, Padova, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica

Paolucci G.M. (2002), *Lezioni di metallurgia per la laurea in Ingegneria Meccanica*, Padova, Edizioni Libreria Progetto.

Veschi D. (1989), *L'alluminio e le leghe leggere*, Milano, Ed. Hoepli