

**Convegno Nazionale**

**VALUTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO  
VGR 2006**

*Pisa, Ottobre 2006*

**ANALISI STRUTTURALE DI UN IMPIANTO  
CARICO/SCARICO GPL PER AUTOCISTERNA  
IN SEGUITO A SITUAZIONI INCIDENTALI.**

**Frendo, F.<sup>1</sup>, Melani, G.<sup>2</sup>, Pilo, F.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Università degli Studi di Pisa Dipartimento di Ingegneria Meccanica, via Diotisalvi, Pisa, Italy

<sup>2</sup> Università degli Studi di Pisa Dipartimento di Ingegneria Meccanica, via Diotisalvi, Pisa, Italy

<sup>3</sup> Comando Provinciale VV.F. di Venezia, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, via della Motorizzazione n. 6, Mestre (Venezia), 37100, Italy

## INDICE

### SOMMARIO

PREMESSA .....	3
1 Introduzione.....	3
1.1 Descrizione dell'impianto .....	3
2 Modellazione della struttura .....	5
2.1 Modello della struttura del telaio e delle tubazioni .....	6
2.2 Modellazione della valvola di sicurezza.....	7
3 Analisi svolte .....	8
3.1 Stima dei carichi applicati .....	8
3.2 Effetto del disassamento del carico .....	9
3.3 Effetto di modifiche strutturali .....	9
3.4 Risultati delle simulazioni per la struttura dell'impianto.....	9
3.5 Reazioni sulla valvola di sicurezza.....	12
4 Conclusioni e sviluppi futuri.....	17

### SOMMARIO

Il presente lavoro nasce da una collaborazione tra il Comando dei Vigili del Fuoco di Venezia e in particolare il Nucleo Operativo Chimico Speciale (N.O.C.S.) e l'Università degli Studi di Pisa Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

Il lavoro costituisce una parte di un progetto di studio più ampio al quale partecipa anche il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova che ha come scopo primario quello di valutare la sicurezza di tutta la parte impiantistica dei veicoli adibiti al trasporto di sostanze pericolose.

La parte impiantistica del veicolo normalmente non è soggetta ad analisi di rischio e valutazioni incidentali mentre normalmente risulta soggetta a rischi notevoli che sono aggravati dalle caratteristiche del prodotto trasportato.

L'attività generale che prende spunto da incidenti realmente accaduti che il Nucleo Operativo Chimico Speciale di Venezia si è trovato ad affrontare e risolvere vuole affrontare le tematiche di sicurezza al fine di dare degli indirizzi progettuali e metodologici la cui applicazione dovrebbe portare ad una riduzione dei rischi connessi al trasporto di sostanze pericolose.

Nel caso particolare del presente lavoro si è provveduto ad analizzare nel dettaglio una situazione di rischio che si è sviluppata in seguito ad un incidente stradale che ha coinvolto una autobotte trasportante GPL che ha causato la parziale rottura e conseguente rilascio di prodotto dall'impianto di carico/scarico.

Il trasporto del GPL su strada richiede l'utilizzo di veicoli dotati di apposita cisterna e relativo impianto di carico e scarico. Solitamente la realizzazione di un rimorchio adibito a tale uso consiste nel montare la cisterna e le tubazioni su di un telaio realizzato in precedenza, il quale non è altro che la struttura portante di tutto il rimorchio stesso. Spesso l'impianto di carico e scarico della cisterna deve essere realizzato adattandosi alla struttura del telaio del rimorchio, in modo da rispettare eventuali vincoli di spazio che quest'ultimo impone.

E' quindi possibile che le travi costituenti il rimorchio e l'insieme di tubazioni dell'impianto del gas, unito alle valvole di collegamento tra cisterna e impianto, creino una struttura che in caso di incidente abbia dei comportamenti imprevedibili e che possono provocare malfunzionamenti delle valvole di sicurezza.

Questo studio vuole quindi determinare il comportamento di un rimorchio dotato di cisterna e relativo impianto in modo da poter valutare gli effetti che si hanno alle tubazioni e soprattutto alle valvole di

sicurezza in caso di incidente, visto che c'è già una certa casistica di eventi dove si è avuto un malfunzionamento delle valvole di sicurezza consentendo pericolose fughe di GPL.

## **PREMESSA**

Il presente lavoro nasce da una collaborazione tra il Comando dei Vigili del Fuoco di Venezia e in particolare il Nucleo Operativo Chimico Speciale (N.O.C.S.) e l'Università degli Studi di Pisa Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

Il lavoro costituisce una parte di un progetto di studio più ampio al quale partecipa anche il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova che ha come scopo primario quello di valutare la sicurezza di tutta la parte impiantistica dei veicoli adibiti al trasporto di sostanze pericolose.

L'attività generale che prende spunto da incidenti realmente accaduti che il Nucleo Operativo Chimico Speciale di Venezia si è trovato ad affrontare e risolvere vuole affrontare le tematiche di sicurezza al fine di dare degli indirizzi progettuali e metodologici la cui applicazione dovrebbe portare ad una riduzione dei rischi connessi al trasporto di sostanze pericolose.

Nel caso particolare del presente lavoro si è provveduto ad analizzare nel dettaglio una situazione di rischio che si è sviluppata in seguito ad un incidente stradale che ha coinvolto una autobotte trasportante GPL che ha causato la parziale rottura e conseguente rilascio di prodotto dall'impianto di carico/scarico.

## **INTRODUZIONE**

Il trasporto del GPL su strada richiede l'utilizzo di camion dotati di apposita cisterna e relativo impianto di carico e scarico. Solitamente la realizzazione di un rimorchio adibito a tale uso consiste nel montare la cisterna e le tubazioni su di un telaio realizzato in precedenza, il quale non è altro che la struttura portante di tutto il rimorchio stesso. Spesso l'impianto di carico e scarico della cisterna deve essere realizzato adattandosi alla struttura del telaio del rimorchio, in modo da rispettare eventuali vincoli di spazio che quest'ultimo impone.

E' quindi possibile che le travi costituenti il rimorchio e l'insieme di tubazioni dell'impianto del gas, unito alle valvole di collegamento tra cisterna e impianto, creino una struttura che in caso di incidente abbia dei comportamenti imprevedibili e che possono provocare malfunzionamenti delle valvole di sicurezza.

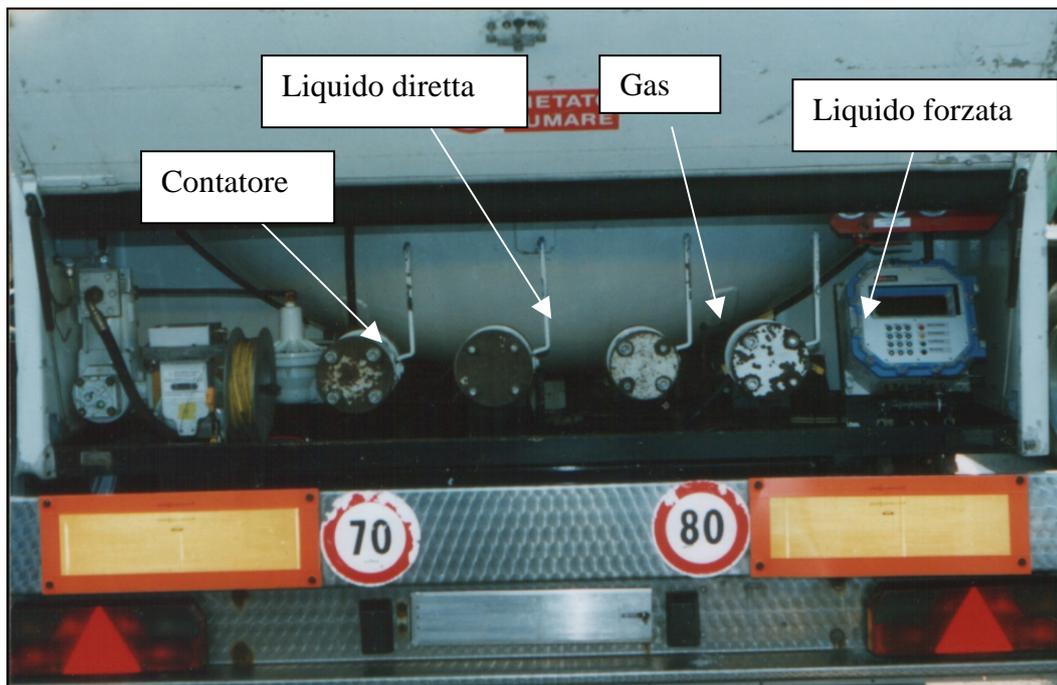
Si vuole quindi determinare il comportamento di un rimorchio dotato di cisterna e relativo impianto in modo da poter valutare gli effetti che si hanno alle tubazioni e soprattutto alle valvole di sicurezza in caso di incidente, visto che c'è già una certa casistica di eventi dove si è avuto un malfunzionamento delle valvole di sicurezza consentendo pericolose fughe di GPL.

### **Descrizione dell'impianto**

Un tipico impianto di scarico di una cisterna contenente GPL è costituito da 4 tubazioni principali:

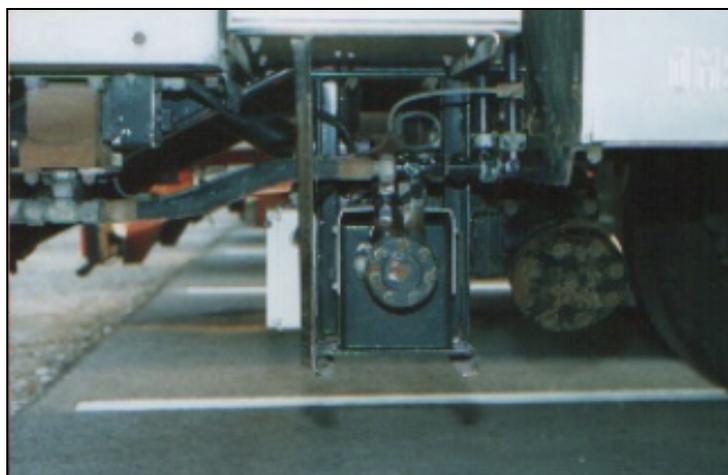
- Tubazione di scarico della fase gassosa del GPL.
- Tubazione di scarico diretta della fase liquida del GPL.
- Tubazione di scarico "forzata" della fase liquida.
- Derivazione di quest'ultima attraverso un contatore.

Si hanno quindi due tubazioni che escono direttamente dalla cisterna (attraverso la relativa valvola di sicurezza) e che solitamente vanno a due flangie in corrispondenza del retro del rimorchio. Dalla tubazione del liquido si dirama un'altra tubazione che va ad una pompa, la quale ha la funzione di permettere il travaso dalla cisterna ad un altro recipiente, attraverso un'altra flangia accanto alle precedenti. A monte di quest'ultima flangia parte un'altra diramazione, la quale va ad un contatore di misura del volume del GPL erogato; ovviamente questa condotta termina con un'ulteriore flangia sul retro del rimorchio, per cui si hanno 4 flangie (visibili in Figura 0-1) con le relative valvole di intercettazione.



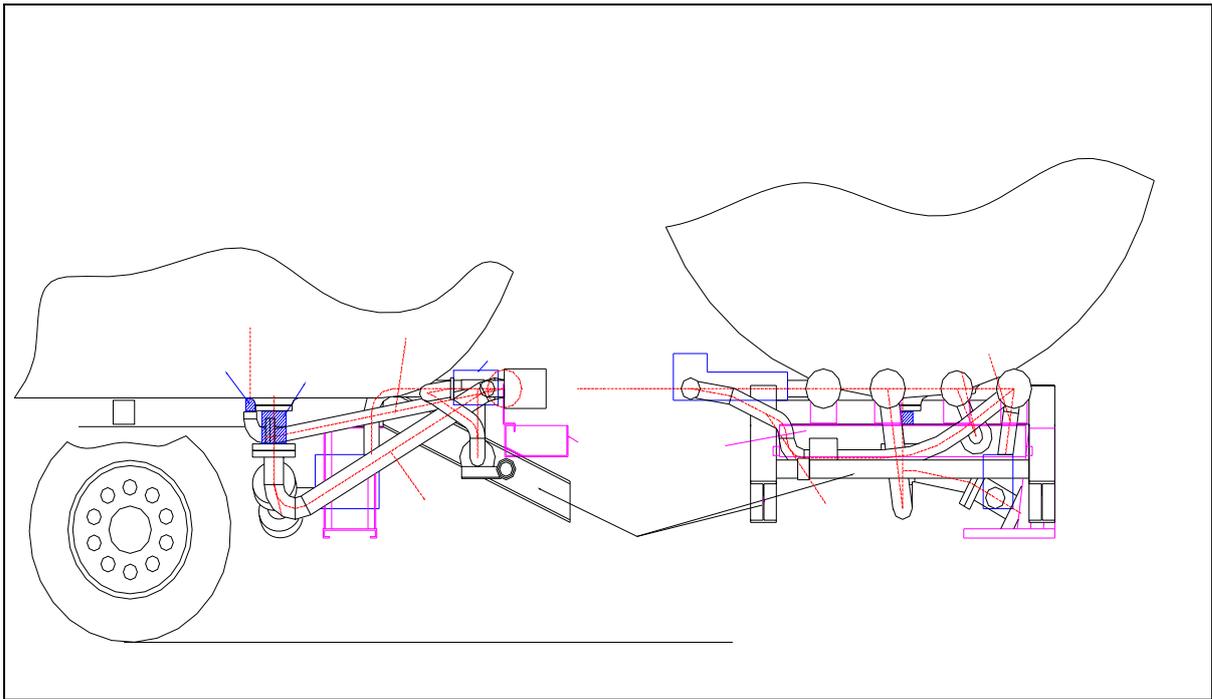
**Figura 0-1 - Flangie dell'impianto di scarico della cisterna.**

Il complesso della tubazione è costituito da una serie di tubi di acciaio di vari diametri che collegano i vari componenti dell'impianto, quali la pompa, il contatore, etc. L'insieme di queste tubazioni è collegato in vari punti alla struttura del telaio del rimorchio tramite staffe solitamente imbullonate a flangie di collegamento delle tubazioni; inoltre l'impianto è vincolato alla struttura del telaio anche attraverso componenti come la pompa, la quale è collegata al telaio tramite un telaietto di lamiera saldate e imbullonate visibile in Figura 0-2.



**Figura 0-2 : Immagine della pompa e del relativo telaietto di supporto**

E' stata fatta una rappresentazione dell'impianto con Autocad (Figura 0-3) per meglio rappresentare l'impianto di scarico della cisterna e le travi costituenti il telaio del rimorchio:



**Figura 0-3 : rappresentazione schematica dell'impianto di scarico della cisterna.**

E' da notare che la valvola di sicurezza di fondo serbatoio è costruita in modo da rompersi in una determinata maniera in caso di forti carichi che agiscono su di essa; infatti è probabile che in caso di incidente le forze di taglio che agiscono sulla valvola facciano troncarsi il proprio corpo a valle del meccanismo di chiusura automatico a molla della valvola stessa; tale invito a rottura è stato realizzato creando uno spallamento a spigolo vivo lungo tutta la circonferenza del corpo della valvola, come si vede in Figura 0-4.



**Figura 0-4 : valvola di fondo serbatoio relativa alla fase liquida**

#### **Modellazione della struttura**

Lo svolgimento di analisi di sollecitazione della struttura tramite un modello FEM ha portato a modellare l'insieme telaio+tubazioni operando alcune semplificazioni; sono stati considerati infinitamente rigidi i corpi "massicci", ossia la pompa, il contatore e le flangie di collegamento tra vari rami delle tubazioni. Sono state considerate infinitamente rigide anche le valvole di sicurezza che collegano la cisterna con l'impianto, così come la cisterna stessa; la valvola di sicurezza relativa alla fase liquida verrà studiata in seguito più in dettaglio, in quanto è quella che provoca solitamente problemi di fughe di gas in caso di incidente.

Saranno applicati dei carichi sulla struttura del rimorchio in modo da determinare le reazioni che si hanno su tali valvole di sicurezza; queste reazioni vincolari saranno in seguito utilizzate come carichi da applicare sulla valvola del liquido in modo da verificare il suo corretto funzionamento in caso di incidente.

### Modello della struttura del telaio e delle tubazioni

La schematizzazione del complesso rimorchio-impianto di carico-scarico è stata compiuta utilizzando un modello FEM realizzato con il software ANSYS.

In prima approssimazione è stata modellata la parte finale delle travi che costituiscono il rimorchio, utilizzando elementi BEAM4, caratterizzati da un comportamento come una trave di De Saint Venant; ad ognuno di questi elementi viene associato il valore della sezione e dei relativi momenti d'inerzia, in modo da rendere possibile il calcolo delle tensioni e delle deformazioni per ogni singola trave.

Elementi analoghi sono stati utilizzati per la modellazione delle tubazioni che costituiscono l'impianto di carico e scarico della cisterna in questione.

Si fa l'ipotesi che la cisterna sia infinitamente più rigida delle tubazioni in corrispondenza del punto di attacco tra la tubazione e la cisterna stessa, in corrispondenza delle valvole di sicurezza, trascurando di fatto le deformazioni della cisterna ma semplificando di conseguenza il modello.

Altri componenti dell'impianto (il cassoncino di supporto delle flangie di carico e scarico ed il supporto della pompa) sono stati modellati utilizzando elementi guscio SHELL63, ai quali sono stati associati i rispettivi spessori delle lamiere che vogliono rappresentare.

I componenti "massicci" quali la pompa, il contatore del liquido e alcune flange di collegamento sono stati modellati da elementi massa ai quali è stata associata una massa pari a quella del componente in questione; questi elementi sono anche stati considerati infinitamente rigidi nei confronti della tubazione stessa.

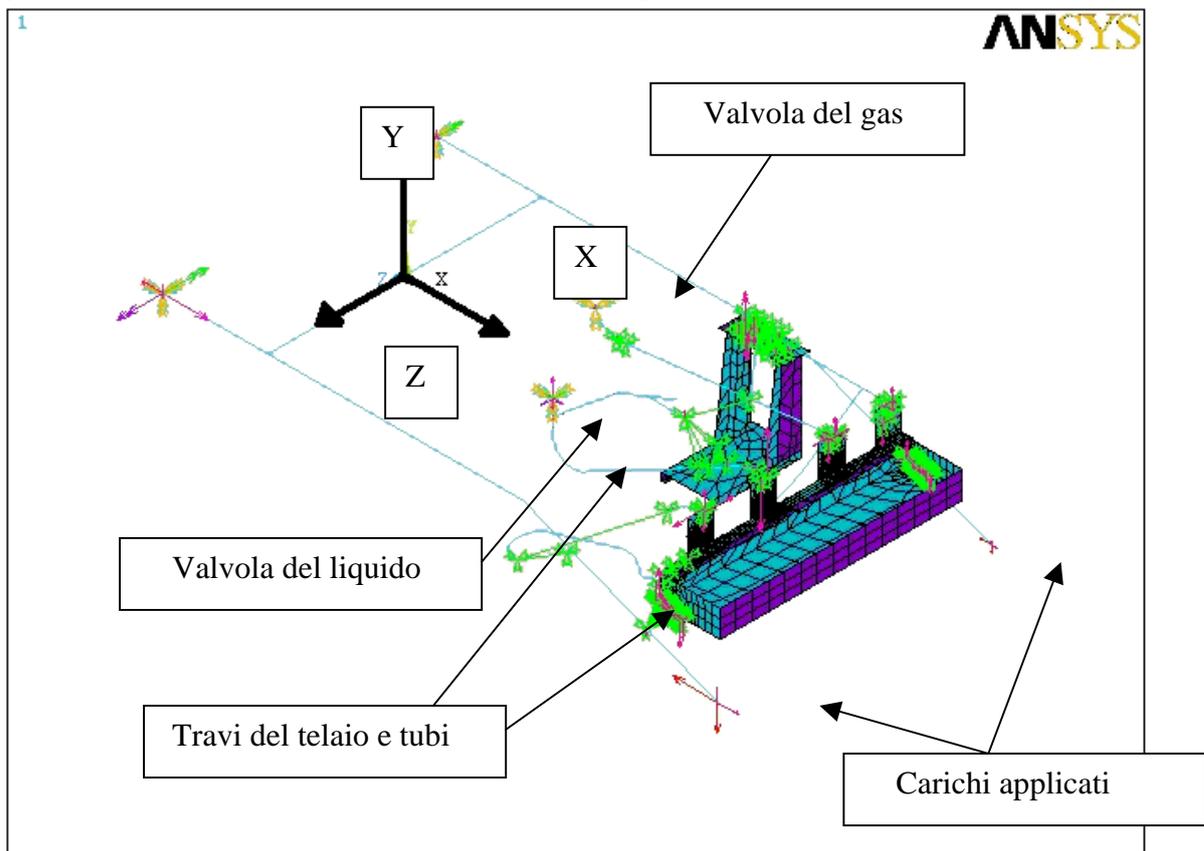


Figura 0-1 : immagine del modello del telaio e dell'impianto di scarico modellata su Ansys.

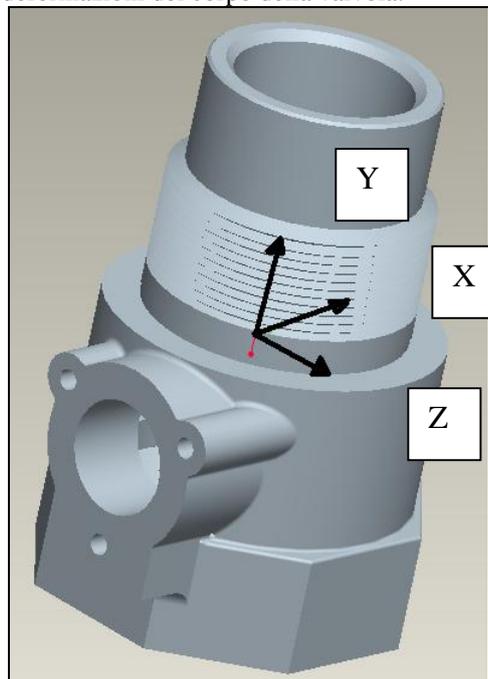
Per quanto riguarda il carico applicato alla struttura, viene simulato un tipico tamponamento tra veicoli pesanti; vengono quindi applicati due carichi alle estremità del telaio del rimorchio in modo da simulare le forze che si scambiano; viene anche fatta l'assunzione che solo in quella zona si ha scambio di forza tra i due veicoli; in pratica si esclude il fatto che il veicolo che segue non colpisca direttamente le flangie poste a fine della tubazione, rendendo di conseguenza più semplice il calcolo delle forze; ovviamente questo modello perde di significato per urti a forte velocità, nei quali il veicolo che segue va a sollecitare direttamente le tubazioni dell'impianto di scarico della cisterna.

Un'altra caratteristica di questo modello è che l'ipotesi che il materiale abbia un comportamento puramente elastico; questa è una approssimazione che porta a risultati non molto realistici per quanto riguarda le deformazioni e le tensioni massime applicate nei vari punti della struttura, però consente comunque di determinare l'effetto che si può avere per le reazioni vincolari del collegamento tubo-valvola al variare di determinati parametri, sia relativi alla struttura che al carico applicato.

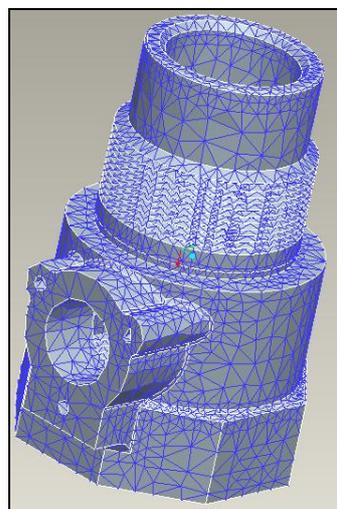
Inoltre un modello puramente elastico è lineare e consente l'esecuzione del calcolo in pochi secondi, contrariamente all'utilizzo di un modello che tiene anche conto del comportamento plastico del materiale, il quale, oltre ad essere caratterizzato da tempi di calcolo molto lunghi, presenta anche problemi di convergenza, ossia il software non è in grado di calcolare la soluzione del problema.

### **Modellazione della valvola di sicurezza**

La valvola di sicurezza relativa alla fase liquida del GPL è stata modellata con l'utilizzo del software PROE; successivamente lo stesso modello solido è stato discretizzato secondo la tecnica FEM dal medesimo programma, mediante il quale sono stati anche applicati i carichi ed i vincoli relativi alla valvola stessa. In seguito il modello discretizzato è stato importato su Ansys il quale ha permesso l'esecuzione dei calcoli e la determinazione delle tensioni e deformazioni del corpo della valvola.



**Figura 0-2 : modello solido del corpo della valvola della fase liquida.**



**Figura 0-3 : modello discretizzato del corpo della valvola**

Per quanto riguarda lo studio della valvola, sono state studiate due differenti configurazioni di vincolo rispetto alla flangia della cisterna; la prima configurazione prevede un montaggio della valvola con la flangia che non arriva al contatto con lo spallamento sul corpo, mentre la seconda prevede quell'appoggio. Inoltre i carichi sono applicati ai filetti di una filettatura interna (non visibile in figura) in corrispondenza della sezione ottagonale, che rappresenta il collegamento con la tubazione del liquido.

E' stato realizzato anche un modello della valvola comprendente l'anello interno del meccanismo di chiusura automatica della valvola, in modo da vedere se questo può avere qualche effetto sulle proprie tensioni e sollecitazioni.

#### Analisi svolte

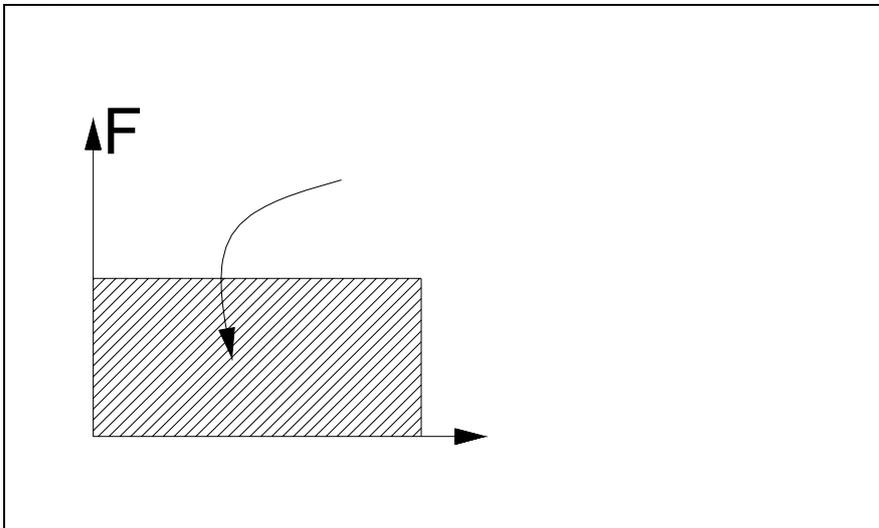
Lo studio di fenomeni relativi a incidenti automobilistici non può essere ridotto ad un solo caso particolare per via delle molteplici variabili in gioco e degli effetti che esse provocano; si è quindi scelto di compiere una campagna di simulazioni modificando un valore alla volta di singoli parametri, in modo da valutare l'effetto che ognuno di essi può provocare sulle sollecitazioni della struttura e sui carichi che si hanno sulla valvola: si hanno di conseguenza dei parametri che riguardano la dinamica dell'incidente, come la velocità del veicolo che seguiva l'autocisterna e il disassamento col quale è avvenuto l'urto, e parametri strutturali, i quali possono riguardare sia la struttura del rimorchio (telaino e tubazioni), sia la valvola, come il differente montaggio della flangia di collegamento con la cisterna.

#### Stima dei carichi applicati

Il calcolo delle forze che nascono durante uno scontro tra due autoveicoli non è determinabile a meno di particolari approssimazioni; ci si limita quindi a calcolare un valore che può essere indicativo dell'ordine di grandezza delle forze in gioco.

Viene compiuta l'ipotesi che il veicolo davanti (l'autocisterna) sia ferma, e che venga colpito da un altro veicolo ad una certa velocità  $V^1$  nella parte posteriore; nella fattispecie si fa l'ipotesi che il veicolo dietro sia un altro camion a pieno carico con una massa di 20 tonnellate.

Si ipotizza anche che tutta l'energia cinetica del veicolo dietro venga dissipata al momento dell'urto sotto forma di deformazione della struttura del veicolo stesso, per cui, ipotizzando un legame costante tra la forza e la deformazione (Figura 0-1), si ricava il valore della forza  $F$  stimando una deformazione (nel caso in questione 150mm) ed uguagliando il prodotto  $L_{def} = F \cdot def = E_{cin}$  all'energia cinetica iniziale del camion dietro.



**Figura 0-1 : legame tra forza e deformazione del telaio del camion che seguiva la cisterna**

Nella fattispecie si determina il valore della forza  $F$  relativo ad una velocità  $V$  di 20 km/h:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m \cdot V^2 = 308642 J$$

di conseguenza la forza viene:

<sup>1</sup>  $V$  non è la velocità effettiva alla quale viaggiava il veicolo dietro, ma è la velocità al momento dell'urto, per cui il valore tiene conto anche dell'eventuale frenata del veicolo stesso.

$$F = \frac{L_{def}}{def} = \frac{E_{cin}}{def} = 2058 KN .$$

Questa metodologia di calcolo particolarmente approssimata determina un andamento quadratico tra la forza applicata ed il valore della velocità  $V$ .

### **Effetto del disassamento del carico**

Negli incidenti automobilistici è praticamente impossibile che si verifichi un tamponamento con gli assi dei due veicoli paralleli e coincidenti. Questo provoca una ripartizione non simmetrica delle forze scambiate tra di loro rispetto all'asse longitudinale del veicolo, la quale può essere stimata studiando la dinamica dell'incidente stesso.

E' inoltre utile determinare l'effetto che si può avere nel caso di strutture asimmetriche (come l'insieme delle tubazioni per l'impianto di carico e scarico della cisterna del GPL) per determinare se un urto spostato verso un lato provoca fenomeni più pericolosi che non verso l'altro.

Nella fattispecie di questo studio è stata svolta una campagna di simulazioni applicando forze ripartite diversamente tra le due estremità delle travi del telaio, in modo da simulare un urto disassato tra i due veicoli. Sono state quindi determinate le reazioni vincolari che nascono tra le estremità delle tubazioni di carico/scarico della cisterna e le relative valvole di fondo serbatoio variando tale ripartizione delle forze, in modo da evidenziare la possibile presenza di situazioni critiche per quanto riguarda il funzionamento corretto delle valvole. Sono state compiute varie simulazioni differenti variando linearmente il valore di forza applicata ad ogni estremità del rimorchio, pur mantenendo il medesimo valore di forza totale, partendo dall'applicare tutta la forza all'estremità sinistra del rimorchio fino alla totale applicazione all'estremità destra dello stesso.

### **Effetto di modifiche strutturali**

L'utilizzo di un modello FEM capace di studiare il comportamento della struttura soggetto a carichi che simulano il verificarsi di un incidente permette anche di determinare l'effetto di modifiche strutturali che possono essere compiute sull'impianto sulle reazioni vincolari in corrispondenza delle valvole; sarà così possibile stabilire delle "linee guida" per la modifica o la progettazione di impianti simili, in modo da consentire alle valvole di sicurezza il corretto funzionamento.

La valvola di sicurezza presenta un intaglio alla base della filettatura di collegamento con la cisterna il quale ha la funzione di favorire una rottura a taglio secondo un piano ortogonale all'asse della valvola stessa.

E' quindi necessario fare in modo di massimizzare le forze su questo piano e contemporaneamente cercare di limitare il più possibile momenti flettenti capaci di generare spostamenti ortogonali al piano in questione, i quali provocherebbero un funzionamento non corretto della valvola di sicurezza.

Vengono di conseguenza modificati uno per volta i seguenti parametri relativi alla struttura dell'impianto:

- Eliminazione del supporto tra la tubazione e la trave trasversale del rimorchio.
- Modifica dello spessore delle lamiere del cassoncino di supporto delle flangie di scarico (invece degli originali 5 mm viene fatta la simulazione con spessori da 3 mm a 9 mm).
- Aumento spessore (irrigidimento) della traversa di collegamento tra le due travi nella parte finale del telaio del rimorchio.
- Modifica dello spessore delle lamiere costituenti il supporto della pompa (3 mm e 9 mm invece degli originali 6 mm).
- Modifica dei raggi dei raccordi delle tubazioni sia all'uscita della tubazione della fase liquida sia in corrispondenza della mandata della pompa.
- Introduzione di un elemento poco rigido in corrispondenza della tubazione a monte della pompa.

### **Risultati delle simulazioni per la struttura dell'impianto**

Le simulazioni svolte hanno l'obiettivo di valutare la differenza tra i risultati relativi al valore della reazione vincolare che si ha in corrispondenza della valvola di sicurezza della fase liquida; l'insieme di tali reazioni ( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ , come si vede in fig.) si può condensare in 2 tipi di sollecitazioni, ossia quelle che tendono a flettere il corpo della valvola ( $F_x, F_z$  ed  $M_x, M_z$ ) e le altre ( $F_y$  ed  $M_y$ ); per quanto riguarda la prima categoria verrà calcolato il valore  $F_{norm}$  ed  $M_{norm}$  che è il modulo del vettore risultante rispettivamente per le forze e per i momenti.

### **Effetto della velocità del veicolo**

Viene studiato il caso che il veicolo dietro urti l'autocisterna ad una velocità rispettivamente di 10 km/h e di 20 km/h, e con un disassamento tale da scaricare la forza per l'80% sulla trave sinistra del telaio del rimorchio della cisterna. I risultati sono i seguenti (come unità di misura si è scelto il N per le forze ed il Nm per i momenti)

carico sinistra 80%	Nodo 453 (attacco tubo-valvola fase liquida)						Risultante			
note:	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fnorm-liq	Fy-liq	Mnorm-liq	My-liq
10km/h	72486	133280	-7058	36098	-10409	62528	72829	133280	72200	-10409
20km/h	303540	574910	-27089	169510	-51552	257650	304746	574910	308411	-51552

**Tabella 1 : reazioni sulla valvola del liquido al variare della velocità.**

Si può notare come le reazioni sulla valvola nel caso della velocità doppia siano approssimativamente 4 volte quelle della velocità di 10 km/h, come ipotizzato in base al metodo utilizzato per la determinazione della forza da applicare alla struttura.

**Effetto del disassamento della forza applicata**

Si studia il caso che la forza complessiva sia applicata con varie ripartizioni tra la trave destra e la trave sinistra della struttura del telaio, in modo da simulare il comportamento della struttura per incidenti con differente angolo di impatto tra i due veicoli: si hanno i seguenti risultati relativi ad una velocità del veicolo pari a 20 km/h:

	Nodo 453 (attacco tubo-valvola fase liquida)						Risultante			
note:	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fnorm-liq	Fy-liq	Mnorm-liq	My-liq
100% sinistra	296090	539300	-43535	148170	-38152	252420	299273	539300	292695	-38152
80% sinistra	303540	574910	-27089	169510	-51552	257650	304746	574910	308411	-51552
50% sinistra	324550	625120	-31853	199680	-70755	264840	326109	625120	331681	-70755
20% sinistra	344750	677500	-29335	231120	-90625	272470	345996	677500	357290	-90625
100% destra	358050	712040	-22436	251860	-103740	277480	358752	712040	374738	-103740

**Tabella 2 : reazioni sulla valvola del liquido secondo la ripartizione della forza tra i lati del telaio.**

Si nota come l'intensità delle reazioni aumenti con lo spostarsi del carico applicato verso destra; questo poteva essere previsto già in partenza in quanto l'impianto delle tubazioni è principalmente disposto sul lato destro del rimorchio.

**Effetto delle modifiche strutturali**

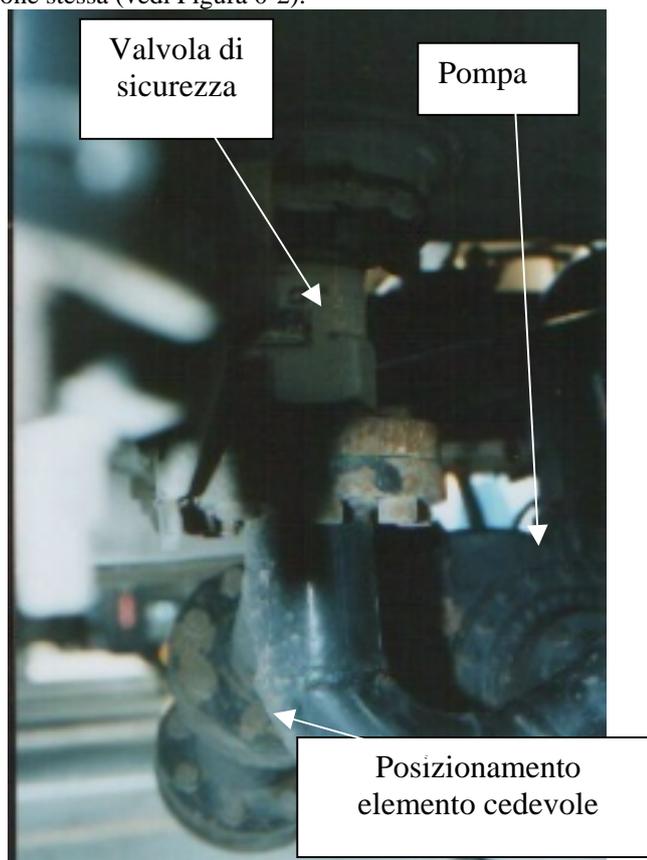
Vengono ora studiati i differenti valori di reazioni vincolari sulla valvola del liquido per le modifiche effettuate sull'impianto come descritto nel paragrafo 0. I relativi valori, calcolati per una velocità di 20 km/h ed una ripartizione della forza per l'80% a sinistra, si hanno nella tabella seguente:

carico trave sinistra 80%	Nodo 453 (attacco tubo-valvola fase liquida)						Risultante			
note:	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fnorm-liq	Fy-liq	Mnorm-liq	My-liq
originale	303540	574910	-27089	169510	-51552	257650	304746	574910	308411	-51552
senza supporto	290740	533060	-26029	144380	-41657	250120	291903	533060	288800	-41657
trave più rigida	289950	533100	-28234	144390	-41635	250110	291321	533100	288797	-41635
sp=3mm	159060	521200	-7779,7	127640	-17291	262610	159250	521200	291986	-17291
sp=7mm	372890	486310	-29057	131120	-43197	222100	374020	486310	257916	-43197

sp=9mm	416960	442610	-33280	114580	-35979	199040	418286	442610	229664	-35979
spp=3mm	324310	410010	-34903	89893	-53468	241470	326183	410010	257660	-53468
spp=9mm	279920	549730	-9518,1	151120	-38989	244520	280082	549730	287450	-38989
giunto cedevole t.pompa	186550	265130	3537	10547	-2316	198500	186584	265130	198780	-2316
raccordo liq. 60mm	282510	533470	-22397	143410	-40307	251870	283396	533470	289836	-40307
raccordo liq. 130mm	293690	533170	-29325	144940	-42566	249400	295150	533170	288458	-42566
raccordo pompa 60mm	288380	532560	-24319	143930	-40063	249840	289404	532560	288333	-40063
raccordo pompa 130mm	204750	536050	-7365,7	139690	-3041,1	237790	204882	536050	275785	-3041

**Tabella 3 : reazioni vincolari per differenti modifiche strutturali dell'impianto di scarico (sp= spessore lamiere del cassoncino di supporto per le flangie; spp= spessore lamiere del supporto della pompa)**

Si nota come molte di queste abbiano effetti poco significativi, mentre altre invece permettono di ridurre il momento sulla valvola e fanno aumentare il valore della forza di taglio (ad esempio aumentando lo spessore del cassoncino delle flangie). Altre soluzioni permettono di ridurre i carichi sulla valvola, ad esempio con l'adozione di un qualsiasi sistema capace di ridurre la rigidità della tubazione a monte della pompa in modo da caricare meno la tubazione stessa (vedi Figura 0-2).



**Figura 0-2 : immagine della tubazione all'uscita della valvola del liquido.**

Ad ogni modo è da sottolineare che questi valori hanno un significato nel caso che il carico relativo all'incidente sia applicato solo ed esclusivamente alle estremità del telaio del rimorchio e non direttamente all'impianto di scarico della cisterna; in tal caso si avrebbero reazioni molto più intense in corrispondenza

delle valvole del liquido e del gas, per cui questi risultati sono inattendibili in caso di urto avvenuto ad elevate velocità.

### Reazioni sulla valvola di sicurezza

Una volta determinate le reazioni vincolari alle quali è sottoposta la tubazione in corrispondenza della valvola di sicurezza è possibile verificare il comportamento della valvola stessa applicando le stesse reazioni vincolari in corrispondenza dell'interfaccia valvola-tubazione e vincolando la valvola stessa alla flangia solidale con la cisterna, intendendo la flangia e la cisterna infinitamente rigide.

Sono state svolte diverse simulazioni relative al differente posizionamento della flangia di collegamento con la cisterna (a battuta con lo spallamento della valvola oppure no) in modo da verificare se i risultati ottenuti fossero compatibili con la deformazione di una valvola che in seguito ad un incidente reale si è deformata in maniera da comprometterne il proprio funzionamento (vedi Figura 0-3 e Figura 0-4); la flangia di collegamento con la cisterna di questa valvola non arrivava a battere contro lo spallamento della valvola stessa.



**Figura 0-3 : immagine di una valvola di fondo serbatoio deformata impropriamente a causa di un incidente.**

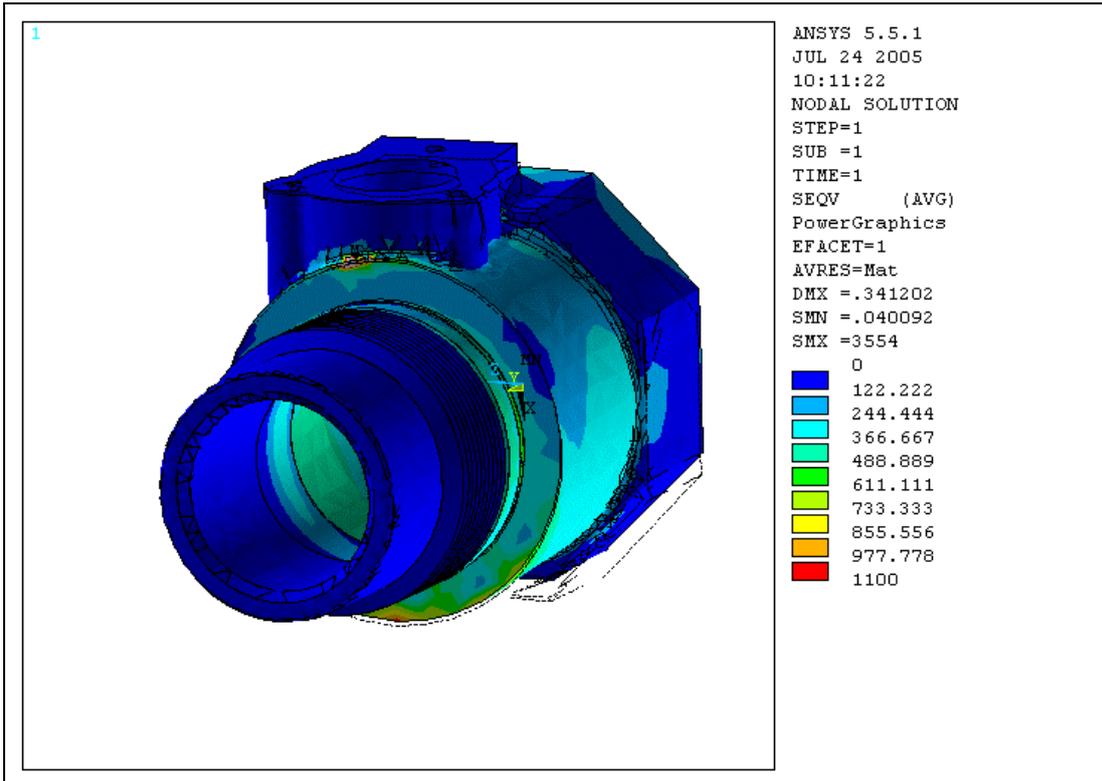


**Figura 0-4 : sezione della medesima valvola deformata ; si noti l'anello di supporto del meccanismo di chiusura automatica.**

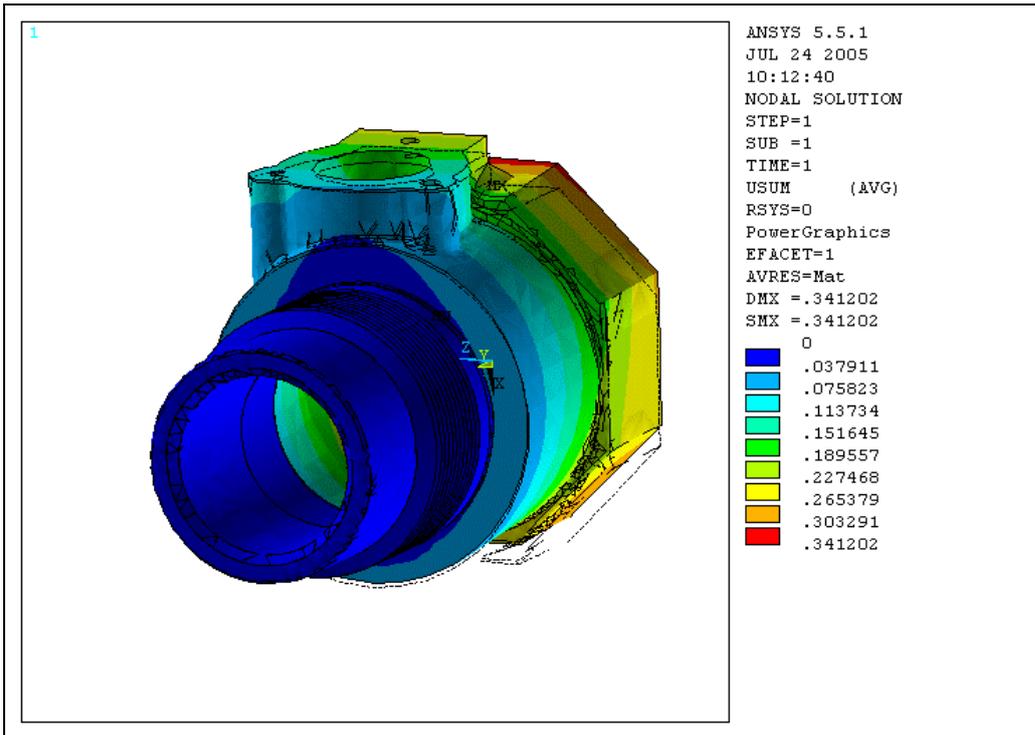
Le simulazioni del comportamento della valvola sono state svolte applicando ad essa, in corrispondenza dell'interfaccia tra la tubazione e la valvola stessa, i valori delle reazioni vincolari determinate dalle simulazioni del modello FEM della struttura telaio+impianto di scarico, e precisamente per la configurazioni di carichi relativa alla velocità di 20 km/h con una ripartizione del carico all'80% sulla trave sinistra del telaio del rimorchio.

Di conseguenza si determinano gli stati di tensione e di deformazione sul corpo della valvola per le tre configurazioni di vincolo alla cisterna studiate:

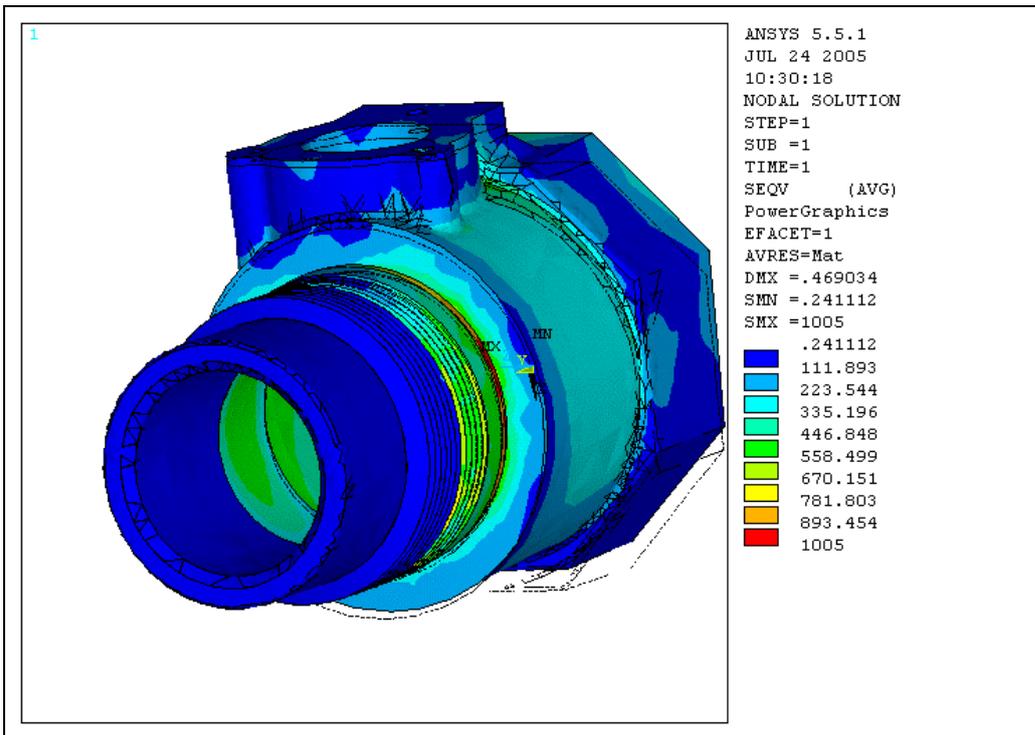
- Corpo della valvola con flangia di collegamento a battuta con lo spallamento del corpo stesso:
- Corpo della valvola con flangia che non va a battuta con lo spallamento del corpo della valvola (ossia montata come quella in Figura 0-3)
- Analoga a quella del punto precedente ma con l'anello di supporto (considerato forzato) del meccanismo di chiusura automatica.



**Figura 0-5 : andamento delle tensioni nel caso di valvola con flangia a battuta con lo spallamento (tensioni massime di circa 1100 N/mm<sup>2</sup>)**



**Figura 0-6 : deformazioni (in mm) della valvola con flangia a battuta sullo spallamento (massimo valore pari a 0,34 mm).**



**Figura 0-7 : tensioni nel caso di flangia non a battuta con lo spallamento (da notare l'andamento in prossimità della filettatura di collegamento con la flangia della cisterna; tensione massima globale pari a 1005 N/mm<sup>2</sup>).**

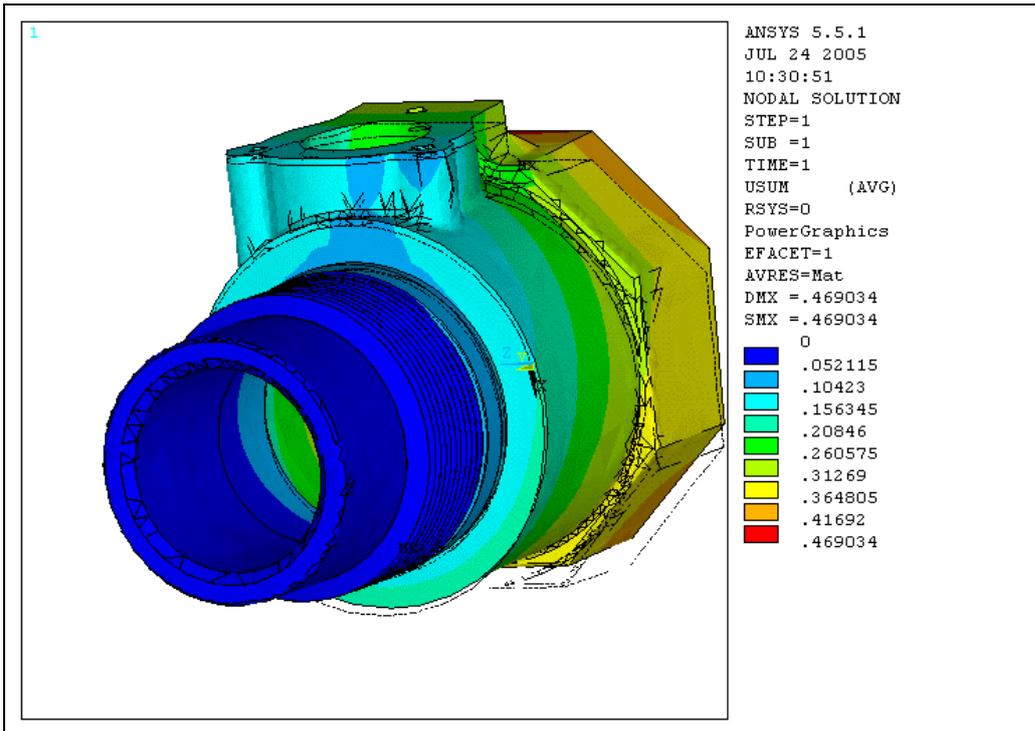


Figura 0-8 : andamento delle deformazioni (in mm) per il caso di flangia non a battuta (deformazione massima pari a 0,46 mm).

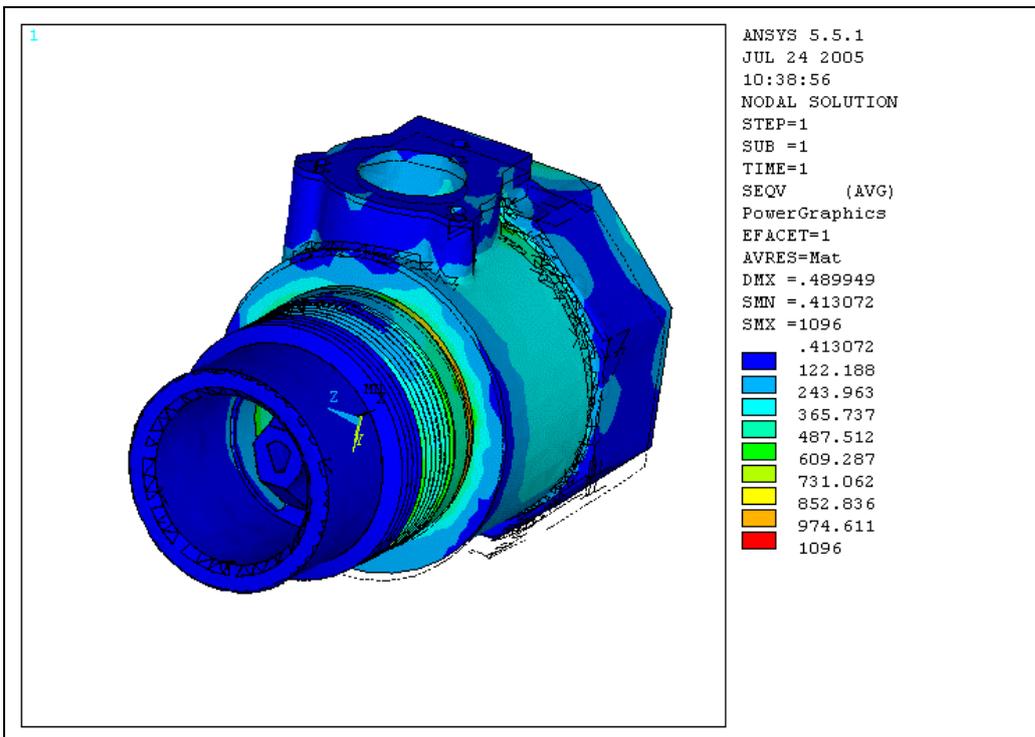
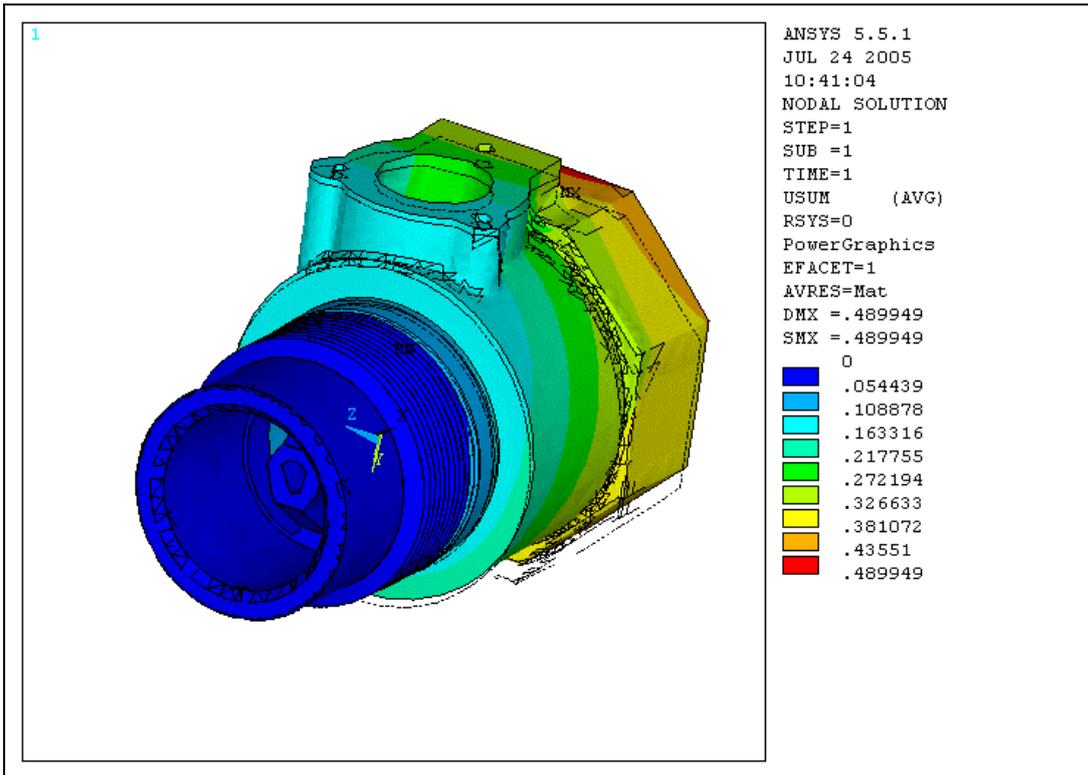
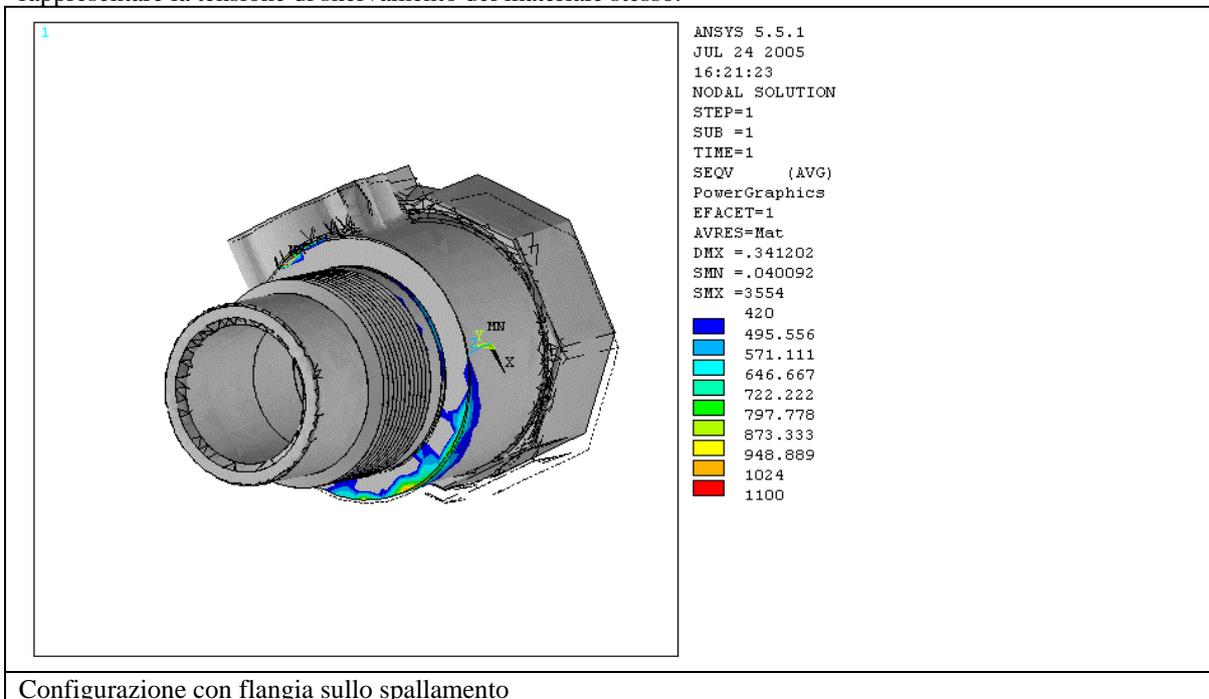


Figura 0-9 : andamento delle tensioni tenendo conto dell'effetto dell'anello interno (tensioni massime pari a 1096 N/mm<sup>2</sup>).

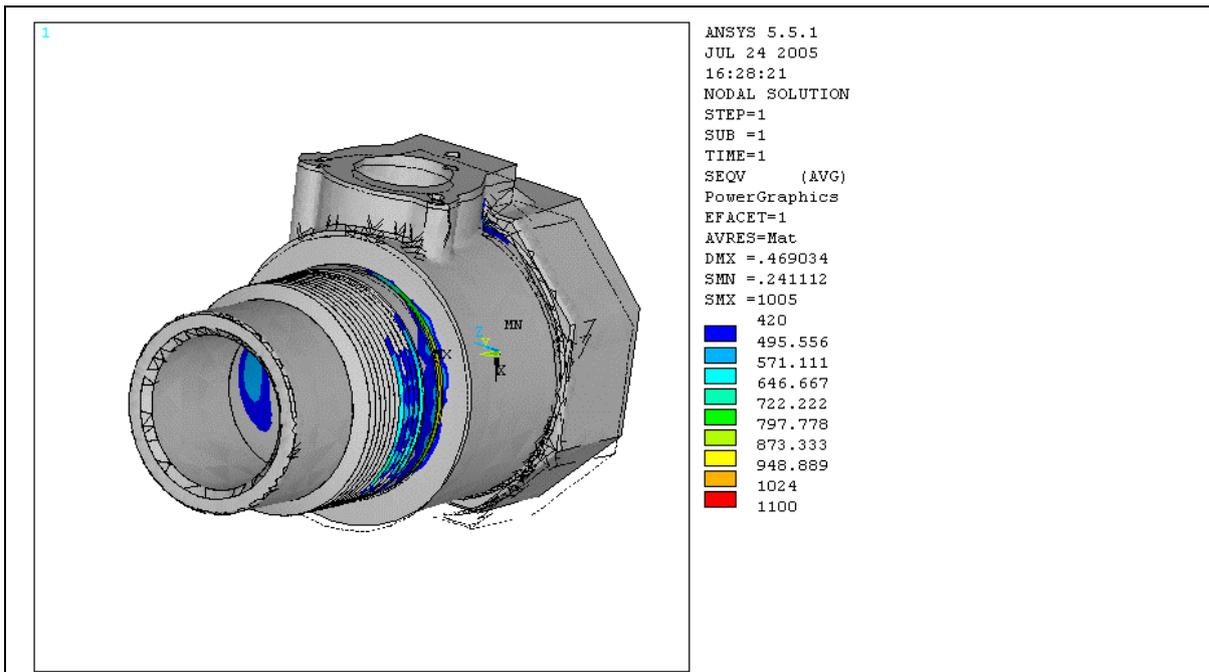


**Figura 0-10 : andamento delle deformazioni con l'effetto dell'anello interno (deformazione massima pari a 0,48 mm).**

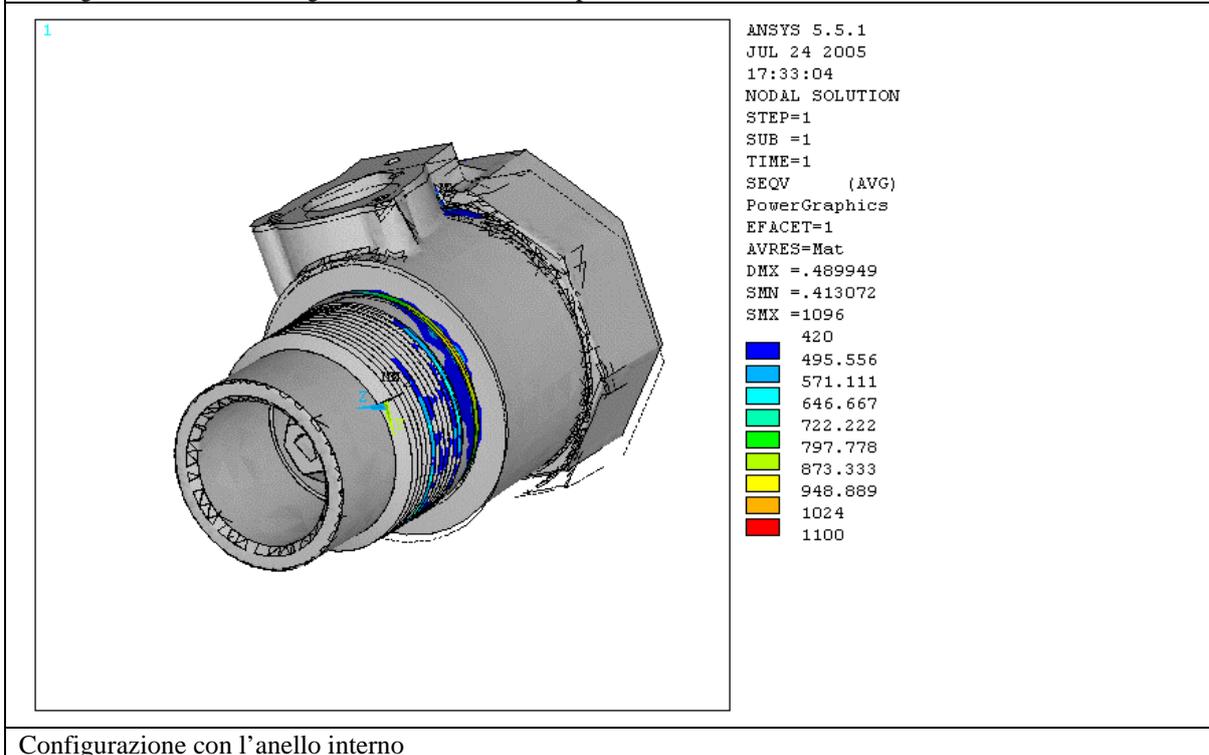
Per vedere meglio le zone di eventuale plasticizzazione si visualizzano di seguito le zone dove si superano valori di tensione (calcolata secondo il metodo di Von Mises) pari a  $420 \text{ N/mm}^2$ ; ipotizzando realisticamente che la valvola sia realizzata di acciaio al carbonio senza particolari trattamenti termici è un valore che può rappresentare la tensione di snervamento del materiale stesso.



**Configurazione con flangia sullo spallamento**



Configurazione con la flangia non a battuta con lo spallamento



Configurazione con l'anello interno

### Conclusioni e sviluppi futuri

Allo stato attuale dei lavori in base ai primi risultati ottenuti è possibile cominciare a fare delle considerazioni interessanti. La prima parte dell'analisi dimostra che nonostante le velocità d'urto estremamente contenute rispetto ai valori reali le sollecitazioni sull'impianti risultano particolarmente importanti tanto da far ipotizzare deformazioni plastiche permanenti di entità importante ed anche la possibilità almeno localmente di rotture. Un secondo fattore importante è determinato dal fatto che l'andamento dei carichi in funzione della velocità d'urto non segue una legge lineare ma ha incrementi molto più consistenti. Nel contempo si nota però la possibilità di ridurre i carichi anche in maniera consistente con variazioni al contorno/impiantistiche limitate.

Il corretto sviluppo del lavoro dovrebbe portare ad un ampliamento del discorso anche su altri tipi di impianto simulando condizioni incidentali diverse. Da questa analisi dovrebbe essere possibile trarre

importanti indicazioni di tipo progettuale che potrebbero essere proposte per l'applicazione diretta sui veicoli. Inoltre tali indicazioni potrebbero essere proposte tramite normativa per l'introduzione sui nuovi veicoli.

Analizzando l'andamento delle tensioni e delle deformazioni della valvola relativa alla fase liquida si nota come in ogni condizione di vincolo studiata il massimo valore di tensione si ha in corrispondenza dello spallamento sul corpo e sul relativo spigolo vivo; questo mette in luce il fatto che per le condizioni di carico applicate la valvola dovrebbe sopportare le sollecitazioni deformandosi in maniera differente da quella reale visibile in Figura 0-3. E' però da notare l'andamento della tensione in prossimità della filettatura nel caso che la flangia non sia stata a battuta con lo spallamento; infatti la filettatura stessa è un elemento particolarmente sollecitato ed un eventuale cedimento della stessa può provocare uno spostamento di tutta la valvola rispetto alla cisterna ed una conseguente disposizione differente dei carichi su di essa, i quali possono provocare deformazioni del corpo valvola differenti da quelle determinate con l'analisi FEM del modello della valvola stessa.

Sarebbe importante riuscire a realizzare uno studio particolareggiato dell'andamento degli sforzi nella filettatura della valvola e della flangia di collegamento alla cisterna in modo da determinare se il cedimento dell'accoppiamento filettato sia stato effettivamente il fenomeno che ha portato al cedimento della valvola in maniera differente da quello per il quale era stata progettata, in quanto le simulazioni FEM compiute della valvola dimostrano che sarebbe dovuta rompersi nella maniera prevista.

A quel punto sarebbe importante determinare la tipologia di carichi sulla valvola che favoriscono l'eventuale cedimento della filettatura per realizzare impianti di scarico capaci di minimizzare tali sollecitazioni utilizzando un modello FEM della struttura dell'impianto simile a quello realizzato in questa sede.