

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale



Dipartimento di Energia

SICUREZZA NELL'IMPIEGO E NEL TRASPORTO DEL GAS DI PETROLIO LIQUEFATTO (GPL)

Relatore: Prof. Carlo Ortolani

Bianca Sannoner Matr. 739662

Mattia Bresesti Matr. 720730

a Fiammetta e Matteo

1	Gas di petrolio liquefatti: generalità	1
1.1	Composizione Chimica	1
1.1.1	Miscele commerciali di GPL	3
1.2	Proprietà termofisiche	4
1.2.1	Tensione di vapore	7
1.2.2	Densità	9
1.2.3	Viscosità dinamica	10
1.2.4	Legame temperatura - pressione	11
1.2.5	Potere Calorifico	13
1.2.6	Numero di Ottano	14
1.2.7	Idoneità materiali	14
1.2.8	Conducibilità	15
1.2.9	Solubilità	15
1.2.10	Caratteristiche olfattivo-visive e tossicità	15
1.2.11	Impatto ambientale	17
1.3	Caratteristiche di infiammabilità	18
1.3.1	Etano	18
1.3.2	Propano	20
1.3.3	Propilene	26
1.3.4	Butano	29
1.3.5	Butileni	32
1.3.6	Isobutano (dimetil-propano)	34
1.3.7	Pentano	34

1.3.8	Isopentano	37
1.3.9	Limiti d'infiammabilità del GPL	37
1.4	Produzione del GPL	41
2	Impieghi	44
2.1	Uso domestico e civile	46
2.2	Autotrazione e trasporti	48
2.2.1	Specifiche ambientali e tecniche	53
2.2.2	Consumi	54
2.3	Usi complementari	55
2.3.1	Usi agricoli e zootecnici	56
2.3.2	Usi industriali	56
2.3.3	Altri impieghi	57
3	Norme di sicurezza e stoccaggio del GPL	58
3.1	Introduzione alla normativa sul GPL	58
3.2	Stoccaggio del GPL	65
3.2.1	Operazioni di movimentazione	72
3.2.2	I Serbatoi	73
3.2.3	Norme e criteri di progettazione	78
3.2.4	Criteri di sicurezza negli impianti di stoccaggio di GPL	80
3.2.5	Criterio di riempimento dei contenitori del GPL	84
3.2.6	Collaudo e revisione contenitori: pressione di prova	86
3.3	Trasporto del GPL	87
3.3.1	Sicurezza del trasporto stradale	89
3.3.2	Sicurezza del trasporto ferroviario	95
4	Scenari incidentali da rilascio di GPL	98
4.1	Introduzione all'evoluzione di fenomeni conseguenti al rilascio di GPL	99
4.2	Sorgente di rilascio	101
4.2.1	Meccanismi di evaporazione e loro evoluzione temporale	103
4.2.2	Calcolo dei termini di sorgente	108
4.3	Gli incendi	115
4.3.1	Incendi da pozza (pool fire)	117
4.3.2	Fiamme da getti turbolenti (jet fire)	123
4.3.3	Palla di fuoco (fireball)	130

4.3.4	Incendi di nubi di vapore (flash fire)	134
4.3.5	Effetti degli incendi	135
4.4	Le esplosioni	137
4.4.1	BLEVE	139
5	Unconfined Vapor Cloud Explosions	145
5.1	Descrizione del fenomeno d'esplosione UVCE	147
5.1.1	Combustione: deflagrazione vs. detonazione	151
5.1.2	Danni alle persone e alle strutture	155
5.2	Stima degli effetti da UVCE	157
5.2.1	Metodo del TNT equivalente	158
5.3	Incidenti con UVCE	165
5.3.1	Analisi empirica	169
5.3.2	Conclusioni sul confronto UVCE - Flash Fire	180
5.4	Disastro di Flixborough (1974)	182
5.4.1	Scenario incidentale	182
6	Incidente di Viareggio (2009)	192
6.1	Scenario incidentale	193
6.1.1	Fase di rilascio	196
6.1.2	Flash in atmosfera del getto liquido	203
6.1.3	Dispersione, evaporazione e incendio della pozza di GPL	204
6.1.4	Dispersione della nube densa	205
6.1.5	Conclusioni su esplosioni e incendi	206
A	Appendice	209
A.1	Emissioni d'inquinanti nell'autotrazione a GPL	209
A.1.1	Emissioni NOx	211
A.1.2	Emissioni particolato	211
A.1.3	Emissioni CO	212
A.1.4	Emissioni HC	212
A.1.5	Emissioni CO2	213
A.1.6	Emissioni non regolamentate	214
A.1.7	Smog fotochimico	214
A.1.8	Acidificazione e surriscaldamento globale	215
A.1.9	Conclusioni sulle emissioni d'inquinanti	215

A.2	Bombole di GPL: definizioni tecniche	215
A.3	Sicurezza nei trasporti	216
A.3.1	Classificazione merci pericolose secondo la Dir 67/548/CE	216
A.3.2	Classificazione di merci pericolose per il trasporto	217
A.3.3	Codice Kemler	218
A.4	Approfondimento sul rilascio di GPL	222
A.4.1	Formazione della nube di GPL	222
A.4.2	Classi di stabilità di Pasquill	224
A.4.3	Sezione di rottura	225
A.4.4	Flusso di non equilibrio	227
A.5	Onde di detonazione 3D	228
B	Matfile	229

ELENCO DELLE TABELLE

1.1	Composizione Volumetrica del GPL	4
1.3	Principali caratteristiche dei maggiori componenti del GPL	4
1.2	Proprietà fisiche degli idrocarburi di GPL	5
1.4	Altre caratteristiche dei principali componenti del GPL	6
1.5	Composizione del GPL per autotrazione in Europa	7
1.6	Tensione di vapore e densità GPL	10
1.7	Viscosità dinamica dell'acqua	11
1.8	Pressione dei gas del GPL al variare della temperatura	11
1.9	Potere calorifico inferiore dei componenti del GPL	13
1.10	Limiti d'infiammabilità dei singoli componenti del GPL	38
1.11	Limiti d'infiammabilità calcolati delle 25 miscele considerate	39
1.12	Composizione (% in vol.) di alcuni campioni di GPL	40
2.1	Bilancio Energetico Italiano 2008 GPL	44
2.2	Voci del Bilancio Energetico Italiano 2008 GPL	45
2.3	Stazioni di rifornimento del GPL sul suolo nazionale	46
2.4	UNI EN 589:2000	53
2.5	Miscela GPL italiana per autotrazione	54
2.6	Consumi GPL negli ultimi 9 anni	55
2.7	Variazione nei consumi di GPL negli ultimi 9 anni	55
3.1	Coefficienti di riempimento massimi per legge	84
3.2	Pressioni idrauliche di prova	86
3.3	GPL come merce pericolosa di classe 2 ad alto rischio	93

3.4	Prove sui componenti dell'impianto GPL per autotrazione	94
4.1	Termini di sorgente	108
4.2	Alcuni esempi d'efficienza d'irraggiamento F_{rad}	121
4.3	Valori di riferimento previsti dalla G.U. del 9.7.1996 per varie tipologie di incendio di serbatoi di stoccaggio GPL	137
5.1	Valori della massima velocità laminare di fiamma, s_L , di alcuni gas combustibili	150
5.2	Valori limite di sovrappressione per diverse tipologie di danni osservati . .	156
5.3	Alcuni incidenti coinvolgenti incendi o esplosioni di nubi di vapore.	168
5.4	Classificazione di alcuni composti secondo il metodo di Wiekema, (tratta da TNO Yellow Book)	171
5.5	Incidenti (UVCE + flash fire) relativi alla Tabella 5.3	173
5.6	Influenza statistica della densità della sostanza rilasciata sull'incidentalità (UVCE+flash fire)	177
5.7	Densità delle sostanze (allo stato gassoso) coinvolte negli incidenti con UVCE di Tabella 5.3.	179
5.8	Numero e relativa percentuale di incidenti per ciascuna caratteristica empirica rilevante nell'ambito di UVCE da materiali mediamente reattivi . . .	181
6.1	Scheda tecnica del carro cisterna 462R (Gatx)	197
6.2	Condizioni meteorologiche relative alla notte del 29.06.2009 misurate a circa 1,7 km dall'epicentro dell'incidente tra le 23:00 e le 24:00.	198
6.3	Dati iniziali per la soluzione del sistema ODE.	203
A.1	Classi di stabilità di Pasquill	225
A.2	Correlazione tra caratteristiche meteorologiche e classi di Pasquill	226

ELENCO DELLE FIGURE

1.1	Alcani semplici o paraffine	2
1.2	Alcheni semplici o olefine	3
1.3	Tensione di vapore	8
1.4	Esempi di contenitori per il GPL	9
1.5	Liquefazione per compressione	12
1.6	Liquefazione del butano per raffreddamento	12
1.7	Limiti d'infiammabilità dell'etano in aria	19
1.8	Variazione del Ls dell'etano in funzione della temperatura e della pressione	20
1.9	Variazione del Ls dell'etano in funzione della temperatura e della pressione	20
1.10	Limiti d'infiammabilità del propano in funzione della pressione	21
1.11	Pressione d'esplosione e velocità di aumento della pressione in funzione della % di propano	22
1.12	Effetto della temperatura sui parametri d'esplosione	22
1.13	Effetto del volume del reattore sui parametri d'esplosione del propano . .	22
1.14	Variazione del Ls del propano in funzione della temperatura e della pres- sione	23
1.15	Variazione del Ls del propano in funzione della temperatura e della pres- sione	23
1.16	Diagrammi d'infiammabilità del propano in cloro (1) e ossigeno (2)	24
1.17	Diagrammi d'infiammabilità del propano con l'azoto e l'anidride carbonica	24
1.18	Variazione dell'ossigeno di sicurezza del propano in azoto come diluente in funzione di P	25
1.19	Energia minima del propano in funzione della concentrazione d'ossigeno	25
1.20	Limiti d'infiammabilità del propilene in aria	26

1.21	Influenza della temperatura sui limiti d'infiammabilità del propilene	27
1.22	Influenza della temperatura sui limiti d'infiammabilità del propilene in ossigeno	27
1.23	Diagrammi d'infiammabilità del propilene	27
1.24	Pressione d'esplosione in funzione della pressione	28
1.25	Pressione d'esplosione del propilene in ossigeno a temperatura e pressione ambiente	28
1.26	Pressione d'esplosione del propilene a 5 bar e temperatura ambiente	29
1.27	Pressione d'esplosione e velocità massima di aumento di pressione	30
1.28	Variazione del Ls del n-butano in funzione della temperatura e della pressione	30
1.29	Variazione del Ls del n-butano in funzione della pressione e della temperatura	31
1.30	Diagrammi d'infiammabilità del n-butano	31
1.31	Limiti d'infiammabilità dell'1-butene in aria e in ossigeno in funzione della temperatura	32
1.32	Temperature di autoaccensione dei butileni	32
1.33	Diagrammi d'infiammabilità del 1-butene	33
1.34	Diagrammi d'infiammabilità dell' isobutilene con N ₂ e CO ₂	33
1.35	Diagrammi d'infiammabilità dell' isobutilene con vapor d'acqua	34
1.36	Limiti d'infiammabilità del pentano in aria	35
1.37	Diagrammi d'infiammabilità del pentano	36
1.38	Variazione dell'energia minima di accensione del pentano in funzione della % d'ossigeno	36
1.39	Campo d'infiammabilità per miscele aria-combustibile a 1 atm e 25°C [59]	41
1.40	Processo di lavorazione dei grezzi in raffineria	42
1.41	Schema di flusso della raffineria [11]	43
2.1	Confronto scenario attuale con penetrazione GPL	52
3.1	Individuazione delle bombole	64
3.2	Elementi di un grande deposito di GPL	67
3.3	Travasamento tra due serbatoi di grande capacità mediante compressore	68
3.4	Dispositivi antincendio nei punti di travaso del deposito	70
3.5	Imbottigliamento	71
3.6	Serbatoio toroidale per autotrazione	76

3.7	Serbatoio interrato per uso domestico	77
3.8	Schema indicativo delle distanze di sicurezza per una corretta installazione dei serbatoi interrati	77
3.9	Schema indicativo delle distanze di sicurezza per una corretta installazione di depositi fuori terra fino a 3m ³	78
3.10	Simbolo di merce trasportata infiammabile	91
3.11	Esempio di cartello con numeri NIP e NIM	91
3.12	Numero di Incidenti rilevanti nell'UE	96
4.1	Un generico albero d'evento	99
4.2	Albero d'evento del rilascio di GPL	99
4.3	Evoluzione temporale della generazione di vapore dal liquido rilasciato [61]	104
4.4	Generazione di vapore da cedimento catastrofico del serbatoio o da tubazione frantumata	107
4.5	Generazione di vapore da serbatoio forato	107
4.6	Rilascio a spruzzo	113
4.7	Campo d'infiammabilità del GPL	115
4.8	Effetto della temperatura sul Li(LFL) e sul Ls(UFL) [59]	115
4.9	Possibili scenari d'incendio.	117
4.10	Pool-fire da una pozza di combustibile liquido (modificata da Aiche [76]) .	118
4.11	Due differenti approcci per stimare la radiazione termica prodotta da un pool fire.	120
4.12	Modello di fiamma puntiforme (nel baricentro).	122
4.13	Parametri geometrici della fiamma.	123
4.14	Jet-fire di un getto di propano liquefatto (modificata da Aiche [76])	124
4.15	Andamento qualitativo dell'altezza di una fiamma diffusiva verticale in aria calma al variare della velocità di scarico.	125
4.16	Classificazione delle fiamme in funzione del numero di Froude e di Zukoski (modificata da INERIS [78])	126
4.17	Schematizzazione di un jet fire.	129
4.18	Fireball	130
4.19	Sequenza di un fireball di propano (portata = 41 kg/s): a) 10 s prima dell'innesco; b) 1 s dopo l'innesco; c) 3 s dopo l'innesco; d) 8 s dopo l'innesco.	133
4.20	Flash Fire	134
4.21	Flash fire di una nube densa di vapori infiammabili.	135

4.22	Radiazione termica incidente kW/m^2	138
4.23	BLEVE di GPL.	138
4.24	Fasi antecedenti al BLEVE di un serbatoio di GPL.	139
4.25	Curve della tensione di vapore e del surriscaldamento limite per la nucleazione omogenea.	142
4.26	Possibile scenario per BLEVE da GPL	144
5.1	Esplosione di gas in un'area di processo	146
5.2	Diagramma logico per la generazione di un'esplosione o di un incendio a partire dalla dispersione di un gas infiammabile come il GPL.	147
5.3	Propagazione di fiamma per UVCE	148
5.4	Schematizzazione del fronte di una fiamma che si propaga in una miscela infiammabile	149
5.5	Schema concettuale di una deflagrazione	152
5.6	Andamento della sovrappressione in funzione del tempo a un'assegnata distanza dall'epicentro di una esplosione di nubi di vapore non confinate (UVCE).	153
5.7	Andamento della sovrappressione in funzione del tempo a un'assegnata distanza dall'epicentro di un'esplosione ideale	153
5.8	Schema concettuale di una detonazione	154
5.9	Sovrappressioni date dal modello del TNT equivalente e da da alcuni modelli possibili di UVCE (V.C.Marshall, 1976 [60])	158
5.10	Detonazione ideale vs. Deflagrazione UVCE	159
5.11	Efficienza d'esplosione	160
5.12	Curva di sovrappressione incidente per una UVCE in funzione della distanza scalata	162
5.13	Limiti del metodo TNT	163
5.14	Parametri caratteristici dell'esplosione di TNT	164
5.15	Numero di nubi di vapore ignite in un intervallo temporale di cinque anni	169
5.16	Incidenti con nubi di vapore e reattività della sostanza coinvolta, (modificata da Lees [60].)	170
5.17	Massa coinvolta in alcuni incidenti con nubi di vapore di sostanze di media reattività (Wiekema [72].)	172
5.18	Suddivisione degli incidenti (UVCE + flash fire) di Tabella 5.3 per quantità di sostanza rilasciata	174

5.19	Massa coinvolta in 42 incidenti con nubi di vapore di sostanze di media reattività	174
5.20	Distanza percorsa dalla nube di vapore prima dell'innesco in alcuni incidenti con sostanze di media reattività (Wiekema [72]).	175
5.21	Caratteristiche del luogo di incidenti con sostanze di media reattività coinvolte (Wiekema [72]).	177
5.22	Distribuzione incidenti per densità della sostanza infiammabile rilasciata (da Tabella 5.3).	178
5.23	Incidenza della densità della sostanza rilasciata sul numero di UVCE (da Tabella 5.3).	178
5.24	Fotografia dell'alto dello stabilimento della NYPRO	183
5.25	Planimetria dell'impianto	184
5.26	Vista dai laboratori	185
5.27	. Fotografia dell'impianto durante la costruzione. Sono visibili i 6 reattori collegati in serie.	186
5.28	Configurazione dell'impianto dopo la modifica	187
5.29	Collegamento tra i 2 reattori. Si vede il livello del cicloesano nei reattori e nel tubo di collegamento.	187
5.30	Tubo di bypass tra reattore 4 e 6	188
5.31	Fasi del distacco completo del tubo di bypass.	189
5.32	Vista nord. Macerie del principale edificio ad uso uffici nella sezione 27	190
5.33	Il parcheggio dello stabilimento a sud-est dell'edificio principale	191
5.34	Danni dovuti all'esplosione visti dall'alto.	191
6.1	Vagone di testa deragliato nella stazione di Viareggio (a sinistra) e immagine dettagliata dello squarcio nella cisterna di GPL (a destra).	192
6.2	Rappresentazione 3D dello spostamento della nube attraverso le strade del quartiere Terminetto a 66,6 s dall'inizio del rilascio.	195
6.3	Individuazione delle abitazioni esplose e danneggiate.	196
6.4	Caratteristiche geometriche [mm] della ferro cisterna 462 R.	197
6.5	Illustrazione dei termini e dei simboli utilizzati per simulare il rilascio.	198
6.6	Dinamica di scarico del liquido attraverso lo squarcio nell'ipotesi d'innesco successivo alla fine del rilascio.	201
6.7	Diminuzione della temperatura del liquido nel serbatoio a causa dell'evaporazione interna.	202

6.8	Frazione di flash e frazione massica di liquido dopo l'evaporazione flash del getto di liquido scaricato attraverso lo squarcio nel caso d'ignizione dopo 5 min.	204
6.9	Immagini che mostrano che la massicciata della stazione di Viareggio non presentava una superficie piana.	205
6.10	Ricostruzione 3D semplificata degli edifici principali nella zona adiacente all'incidente [67].	206
6.11	Dispersione della densa nube di propano in istanti diversi dall'inizio del rilascio.	207
6.12	Formazione di piccoli e isolati incendi in prossimità del vagone fratturato e deragliato.	208
6.13	Alcuni edifici crollati.	208
A.1	Modello di rilascio istantaneo di una nube di gas denso [61].	223
A.2	Formazione di una nube densa [61].	224
A.3	Portata scaricata da un serbatoio di cloro	227
A.4	Struttura e modello di una struttura reale di un fronte di detonazione . . .	228

Sommario

Con il presente lavoro ci si propone di analizzare alcuni aspetti salienti della sicurezza dei gas di petrolio liquefatti (GPL) traendo spunto dall'incidente ferroviario di Viareggio del 29 giugno 2009. Infatti il deragliamento di una ferro-cisterna contenente GPL nella stazione di Viareggio, che ha provocato 32 vittime e notevoli danni, ha riportato d'attualità la discussione sui sistemi di sicurezza utilizzati per gestire lo stoccaggio, l'utilizzo e il trasporto di questo tipo di combustibile. L'impiego del GPL è in continuo aumento, non solo nel settore domestico, ma anche e soprattutto nel settore dei trasporti. Nell'ultimo anno la diffusione di auto alimentate con questo carburante ha subito un notevole incremento, sia per i costi più bassi rispetto agli altri combustibili tradizionali, sia per il minor impatto sull'ambiente, oltre che per gli incentivi economici governativi. Tuttavia dopo incidenti di questo genere in molti si chiedono se l'utilizzo del GPL sia una scelta accettabile dal punto di vista della sicurezza. L'analisi seguente vuole essere una risposta a tale quesito attraverso lo studio delle caratteristiche intrinseche di questo combustibile, delle normative e dell'incidentalità che lo riguardano. Per quanto riguarda l'incidentalità proprio i fatti di Viareggio hanno dimostrato che i rischi per l'uomo dovuti al GPL non sono legati solo alla sua infiammabilità, ma anche alla sua tendenza a formare una nube di vapore, se rilasciato in ambiente. Di fatto quella tragica notte 11 persone sono morte in pochi minuti, investite dalle fiamme o travolte dal crollo degli edifici. Per spiegare la natura dei crolli bisogna innanzitutto considerare che il GPL viene trasportato in forma liquida sotto una modesta pressione; questo fa sì che fuoriuscendo dal contenitore fratturato, evapori istantaneamente e si trasformi in gas. Poiché il GPL in stato gassoso è più pesante dell'aria, tende a rimanere vicino al suolo, trasformandosi in una nube a frittella (*pancake shaped*) che, se efficacemente innescata (e.g. scintille), può incendiarsi e persino esplodere. L'attenzione di questa trattazione è rivolta anche alla differente natura dei fenomeni avvenuti parallelamente quella notte. Infatti alcuni edifici sono sicuramente crollati a causa dell'incremento di pressione dovuto all'innescò della miscela di gas penetrata in scantinati, garage e piani terra, ove effettivamente è possibile riscontrare un elevato grado di confinamento ($\simeq 1$ con finestre e porte chiuse). Tale fenomeno corrisponde all'esplosione di una nube in volumi confinati (Confined Vapor Explosion, CVE). Tuttavia dai rilievi e dalla documentazione fotografica è emerso che alcuni elementi strutturali, come il tetto dell'edificio prospiciente la stazione, hanno riportato danni

da incremento di pressione, senza essere raggiunti direttamente dalle fiamme. Si ritiene che questi danni siano imputabili al fenomeno che prende il nome di esplosione in ambiente non confinato, in inglese UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion): l'onda di pressione che ne deriva può avere gravi effetti, diretti e indiretti, sull'uomo e sulle strutture, come è successo a Viareggio. Pertanto si è ritenuto opportuno approfondire nel seguito della trattazione questa ipotesi incidentale.

CAPITOLO 1

GAS DI PETROLIO LIQUEFATTI: GENERALITÀ

1.1 Composizione Chimica

I Gas di Petrolio Liquefatti, noti con la sigla GPL¹, sono miscele di idrocarburi **alifatici**, ovvero caratterizzati da catene di atomi di carbonio che non sono ordinati a formare una struttura ad anello; infatti gli alifatici sono anche noti con il nome di *composti a catena aperta*. Tra questi i componenti del GPL si distinguono in:

- **alcani**: comunemente chiamati paraffine, sono idrocarburi alifatici che contengono il massimo numero di atomi di idrogeno compatibile con il vincolo del carbonio a formare sempre quattro legami e dell'idrogeno a formarne uno. Pertanto sono detti idrocarburi saturi e hanno formula chimica generale C_nH_{2n+2} . A questa categoria appartengono:

- propano C_3H_8
- butani C_4H_{10} : n-butano e isobutano
- metano CH_4
- etano C_2H_6
- pentani C_5H_{12}

ove propano e butani sono i maggiori costituenti del GPL;

¹I GPL sono essenzialmente miscele di isomeri C_3 - C_4 con tracce di composti più pesanti C_5 e più leggeri C_1 ÷ C_2 .

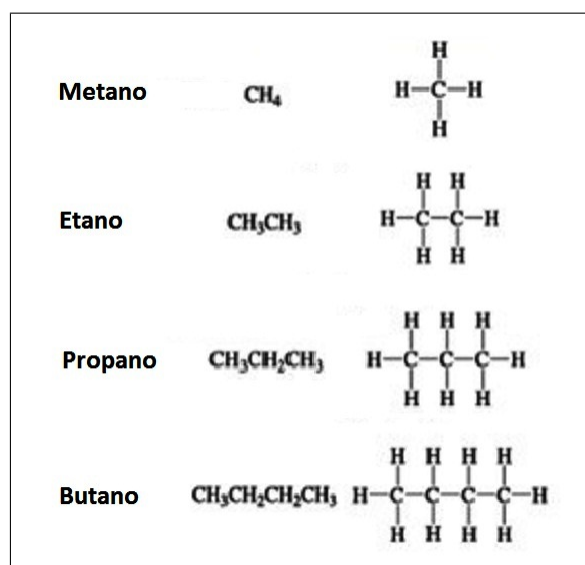
- **alcheni**: comunemente chiamati olefine, sono idrocarburi alifatici che contengono almeno un doppio legame carbonio-carbonio come gruppo funzionale. Sono detti quindi idrocarburi insaturi, poichè non presentano il massimo numero possibile di atomi di idrogeno e hanno formula C_nH_{2n} . A questa categoria appartengono:

- butileni C_4H_8 : 1-butene, 2-butene
- isobutilene C_4H_8
- propilene C_3H_6
- etilene C_2H_4

i butileni, isobutilene e i C_2 sono presenti nel GPL in piccolissima percentuale.

Sia gli alcani che gli alcheni che costituiscono il GPL sono evidentemente idrocarburi leggeri. Nella Tabella 1.12 a pagina 40 è riportata la composizione di 25 campioni di GPL, ottenuta tramite analisi gascromatografiche effettuate dalla Stazione Sperimentale per i Combustibili.

Figura 1.1: Alcani semplici o paraffine

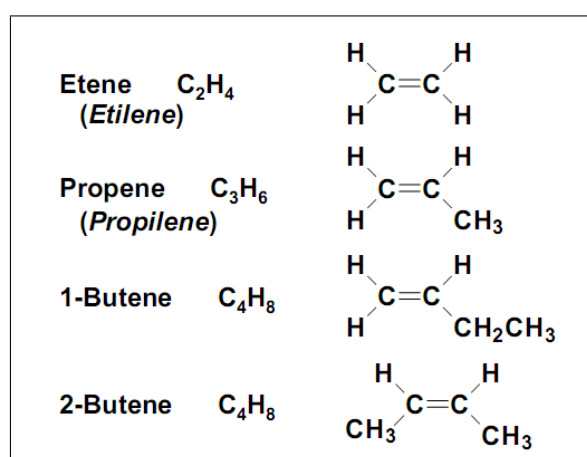


Il GPL, inoltre, in base al ciclo di produzione e alle operazioni di depurazione e stabilizzazione, come quelle di riempimento dei recipienti, può contenere altri componenti quali acetilene C_2H_2 , gas non idrocarburici, prodotti solforati, acqua e sostanze solubili derivanti dai procedimenti di lavaggio.

Queste sono impurità che inquinano il prodotto e lo rendono potenzialmente corrosivo e quindi nocivo per gli apparecchi di contenimento e di utilizzazione, in quanto possono disturbare il regolare funzionamento degli organi di regolazione e dei bruciatori, contribuendo a diminuire il grado di sicurezza del GPL.

Inoltre, ai fini fiscali, se destinato alla combustione contiene un prodotto denaturante, nella misura di 4 g ogni 100 kg di GPL, come stabilito dal D.M. 21.3.1996 del Ministero delle Finanze [4].

Figura 1.2: Alcheni semplici o olefine



1.1.1 Miscele commerciali di GPL

Propano e butano raramente vengono commercializzati singolarmente, poichè la loro miscelazione permette di ottenere un ottimo compromesso in termini di potere calorifico (cfr. Tabella 1.9 a pag. 13) e volatilità (cfr. Tabelle 1.3 e 1.4 a pag. 4 per le temperature di ebollizione).

Il GPL è quindi una miscela liquida a temperatura ambiente e a pressioni relativamente modeste (5 ÷ 8 bar), ed essa esiste in diverse formulazioni commerciali. Le percentuali di propano, propilene, butano e butileni presenti in miscela dipendono dalla fonte di produzione.

Le miscele commerciali, così come definite nel Regolamento approvato con D.M. 22 luglio 1930 e successive serie di N.I. sono denominate Miscela A, Miscela A0, Miscela A1, Miscela B, Miscela C².

²come riportato nel Decreto Ministeriale 15/05/1996 (Suppl. ordinario G.U. 09/07/1996 n. 159).

Tabella 1.1: Composizione Volumetrica del GPL

	Propano [%]	N-butano[%]	Isobutano [%]
Miscela A	5	80	15
Miscela A0	30	35	35
Miscela A1	50	25	25
Miscela B	70	10	20
Miscela C	97	1	2

- miscela A corrisponde al **butano commerciale**;
- miscela A0 corrisponde alla **miscela 30/70**;
- miscela A1 corrisponde alla **miscela 50/50**;
- miscela B corrisponde alla **miscela 70/30**;
- miscela C corrisponde al **propano commerciale**;

Le percentuali di propano, propilene, butano e butileni etc... attribuiscono alle miscele di GPL diverse caratteristiche fisiche, riportate in Tabella 1.2, che sono importanti per le loro possibilità d'impiego.

1.2 Proprietà termofisiche

Dal momento che la composizione del GPL non è definita in modo esatto, le specifiche di fornitura hanno margini di variabilità sia relativamente alla stessa composizione sia alla densità. Le proprietà finali della miscela, dunque, saranno legate alla proprietà e alla percentuale dei singoli componenti.

Gas	Teb [°C]	Tfus [°C]	cv [kJ/kg] (15,5°C)	cp [kJ/kg] (15,5°C)	Densità fase liquida [kg/l] (15,5°C)	Densità fase gas [kg/m3] (15,5°C)
propano	-42,1	-187,6	1,4319	1,6266	0,508	1,8613
n-butano	-0,5	-138,3	1,5198	1,6622	0,584	2,4524
isobutano	-11,7	-159,6	1,4738	1,6211	0,563	2,4524

Tabella 1.3: Principali caratteristiche dei maggiori componenti del GPL

Tabella 1.2: Proprietà fisiche degli idrocarburi di GPL

CARATTERISTICHE FISICHE ^a								
Sostanza	Tens.vap.ass. 37,8 °C (atm)	Stato normale	P.to eboll. [°C]	Densità del liquido [kg/l]	Litri di gas da 1 litro di liquido	Litri di gas da 1 kg di liquido	Densità del vap. [kg/m ³]	Densità del vap. (aria =1)
<i>etilene</i>	-	gas	-103,7	-	333,7	824	1,184	0,968
<i>etano</i>	-	gas	-89,0	0,374	294,3	789	1,269	1,038
<i>propilene</i>	15,97	gas	-47,7	0,522	283,5	543	1,776	1,453
<i>propano</i>	13,32	gas	-42,1	0,508	272,7	538	1,861	1,522
<i>isobutano</i>	5,16	gas	-11,7	0,563	229,3	407	2,452	2,006
<i>butilene-1</i>	4,38	gas	-6,3	0,601	252,9	421	2,369	1,931
<i>isobutilene</i>	4,47	gas	-6,9	0,600	254,0	353	2,369	1,937
<i>n-butano</i>	3,65	gas	-0,5	0,584	237,8	408	2,452	2,006
<i>isopentano</i>	1,42	liquido	27,9	0,625	205,0	329	3,045	2,491
<i>pentene-1</i>	1,36	liquido	30,0	0,646	218,3	338	-	-
<i>n-pentano</i>	1,09	liquido	36,1	0,631	207,0	329	3,045	2,491

^asalvo quando indicato diversamente i valori sono riferiti alla pressione di 1 atm e alla temperatura di 15,5°C

Gas	Tensione di vapore a 50 e 70 °C [bar]	Flash Point [°C]	Punto Critico T, P	Viscosità dinamica in fase liquida Pa·s
propano	16,0 – 26,02	–104	96,5°C – 42,5 bar	$11 \cdot 10^{-5}$
n-butano	5,25 – 7,21	–60	151°C – 37,96 bar	$17 \cdot 10^{-5}$
isobutano	7,09 – 10,09	+28	134,98°C – 37,2 bar	$33,3 \cdot 10^{-5}$

Tabella 1.4: Altre caratteristiche dei principali componenti del GPL

Come precedentemente accennato e come si può notare dalle Tabelle 1.2, 1.3 e 1.4, alcune proprietà dei singoli componenti possono essere molto diverse: ad esempio il propano è più leggero, più volatile (gassifica a temperatura superiore a -42°C e a pari T ha maggiore tensione di vapore) e possiede un potere calorifico (Tabella 1.9 a pag. 13) in kcal/m^3 più basso del butano, che invece rimane allo stato liquido a temperature inferiori a $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Queste differenze fanno sì che nella pratica, ad esempio, la miscela di GPL abbia una stagionalità: per esempio in Daminarca d'inverno la percentuale di propano nel GPL viene incrementata e si usa per l'autotrazione una miscela 70/30, rispetto alla 50/50 impiegata nei mesi estivi. E' dunque evidente che le due miscele, avendo composizione diversa, avranno proprietà chimico - termofisiche differenti.

La tendenza danese accomuna tutti i Paesi Europei, come mostrato nella Tabella 1.5: in inverno è infatti auspicabile utilizzare un GPL con preponderanza di propano per evitare, soprattutto, problemi di avviamento a freddo (autotrazione, trasporti) e di accensione (riscaldamento). Infatti dei due principali costituenti del GPL il propano è il più pregiato, data la sua grande volatilità e conseguente maggiore facilità di accensione. D'inverno, dal momento che la temperatura scende facilmente sotto gli 0°C , il butano si mantiene allo stato liquido: da qui la necessità di limitarne la percentuale in miscela nei mesi freddi.

Tabella 1.5: Composizione del GPL per autotrazione in Europa

Paese	rapporto Propano/Butano	
	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>
<i>Germania</i>	propano preponderante	
<i>Austria</i>	20/80	80/20
<i>Belgio</i>	30/70	50/50
<i>Danimarca</i>	50/50	70/30
<i>Francia</i>	19/81 definito dalla legge 50/50 25/75 in pratica 35/65	
<i>Gran Bretagna</i>	propano preponderante	
<i>Olanda</i>	30/70	70/30
<i>Italia</i>	20/80	Non definita
<i>Svezia</i>	50/50	100/00
<i>Svizzera</i>	propano preponderante	

Si prosegue analizzando le diverse proprietà chimico-termofisiche delle miscele commerciali di GPL.

1.2.1 Tensione di vapore

Come è noto, la pressione di vapore o tensione di vapore di una sostanza o di una miscela liquida è la pressione parziale del suo vapore quando si raggiunge l'equilibrio fra la fase liquida e la fase gassosa.

Come verrà approfondito nel seguito³, il contenitore, in genere di forma cilindrica orizzontale o verticale (Fig. 1.4), è riempito per circa l'80% di GPL nella fase liquida, mentre nel restante 20% di volume vi sono i vapori di GPL.

L'equilibrio tra fase liquida e fase gas è un'**equilibrio dinamico**, nel senso che alla pressione di equilibrio (detta anche tensione di vapore saturo) la massa del liquido e del vapore non cambiano, anche se continuamente molecole del liquido si trasformano in vapore (vaporizzazione) e molecole del vapore si trasformano in liquido (liquefazione). Il termine **tensione di vapore saturo** sta ad indicare che nemmeno una goccia di liquido, a quella temperatura, può aggiungersi al vapore e viceversa. Per rompere l'e-

³cfr. pag.84

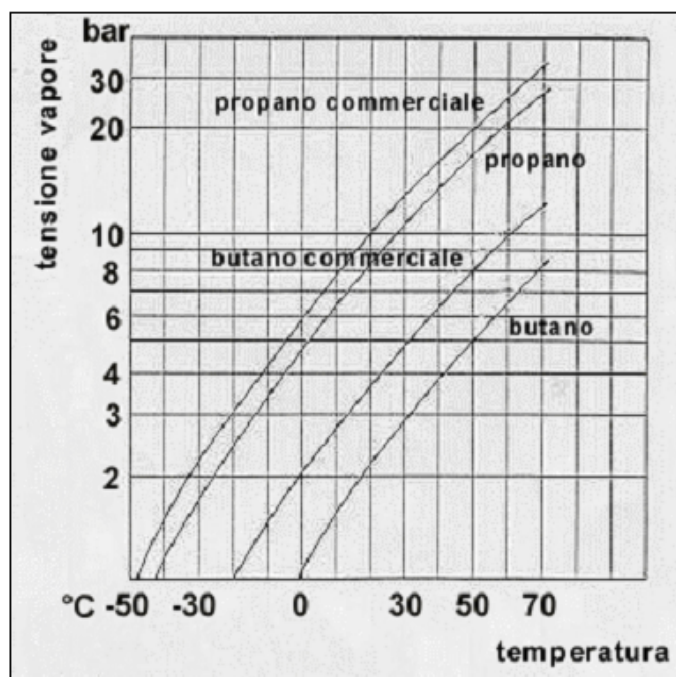


Figura 1.3: Tensione di vapore

quilibrio bisogna togliere del vapore. Ad esempio, mentre si utilizza il GPL, si sottrae vapore e questo viene prodotto a scapito della massa di liquido che, quindi, durante l'utilizzazione evaporerà. Ovviamente un altro modo di modificare l'equilibrio dinamico è variare la temperatura esterna: anche in questo caso varierà la tensione di vapore e di conseguenza lo stress al quale è sottoposto il recipiente metallico.

Infine la tensione di vapore di una sostanza, **P_{vap}**, ne caratterizza la volatilità: maggiore è la tensione di vapore di un composto, maggiore è la sua tendenza a trasformarsi, a partire dalla fase liquida, in vapore. Questo, in accordo con le premesse fatte, è ben evidente dalla Figura 1.3 e dalla seconda colonna della tabella 1.6 : al crescere della percentuale di propano in miscela aumenta la tensione di vapore, e conseguentemente la volatilità: il propano commerciale risulta quindi la miscela più volatile, con **P_{vap}** = 30,40 bar a 70°C.

Una conseguenza pratica indesiderata è dunque che, al crescere della percentuale di propano in miscela, aumenta necessariamente la pressione di esercizio del contenitore.

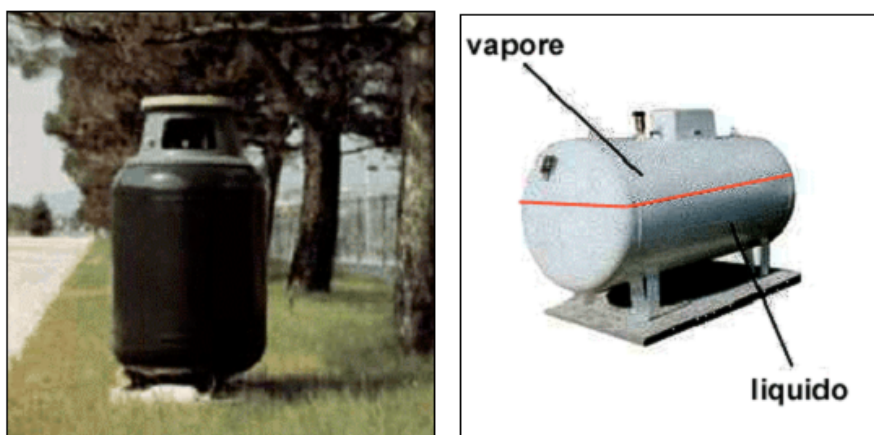


Figura 1.4: Esempi di contenitori per il GPL

1.2.2 Densità

La tabella 1.6 riporta i valori di densità delle miscele commerciali a 15 e a 50 °C. Come atteso la miscela più pesante è il butano commerciale: al crescere della percentuale di propano il GPL diviene via via più leggero.

E' inoltre importante notare che rispetto all'acqua il GPL pesa circa la metà, infatti a 15°C:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} \simeq 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\rho_{\text{GPL}} \simeq 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

Il GPL risulta più leggero anche della benzina, a 15°C vale:

$$\rho_{\text{benzina}} \simeq 0,730 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

Si noti che il nome del GPL deriva proprio dal fatto che i componenti sono in forma gassosa a pressione atmosferica, mentre sono liquidi a pressioni relativamente basse, dell'ordine dei 0,5 MPa (5 bar). Grazie alla liquefazione, la **densità della miscela aumenta di circa 300 volte** rispetto alla forma gassosa, riducendo in tal modo il volume necessario per immagazzinarlo.

Infatti a $T_{\text{amb}} = 15,5 \text{ °C}$ un metro cubo di propano liquido pesa 508 kg mentre un metro cubo di propano in fase gas pesa 1,8613 kg (da Tabella 1.3 a pag.4), per cui si ha che:

$$508 \div 1,8613 = 272,93$$

La caratteristica di aumentare fortemente il volume nel passaggio dalla fase liquida a quella gassosa, che è quantificata per ogni specie nella sesta colonna della Tabella 1.2 a pag. 1.2, si traduce nel fatto che una piccola quantità di GPL liquido produce una grande quantità di gas utilizzabile. Naturalmente questo presenta enormi vantaggi dal momento che una grande quantità di energia contenibile in poco spazio consente di alimentare, con il sistema distributivo più appropriato, qualsiasi utenza con una ottima autonomia.

Tuttavia, se quando si trova in fase liquida il GPL ha un peso specifico inferiore a quello dell'acqua, in fase gassosa è, invece, più denso dell'aria, e quindi più pesante della stessa (da +50% del propano a circa il doppio per l'isobutano, come da ultima colonna della Tabella 1.2), con la conseguenza che se esso si libera allo stato di gas, tende a portarsi verso il terreno. In condizioni atmosferiche (15°C, 101325 Pa) vale:

$$\rho_{\text{GPL}} \simeq 2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{aria}} \simeq 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Il GPL in fase gas può quindi introdursi facilmente in fognie, tombini, cunicoli, dove può creare pericoli di esplosioni.

Tabella 1.6: Tensione di vapore e densità GPL

Miscela Commerciali			
Miscela	Pvap [bar] (70°C)	Densità [kg/l](50°C)	Densità [kg/l](15°C)
A	< 11,79	> 0,525	> 0,575
A0	< 15,69	> 0,495	> 0,543
A1	< 20,60	> 0,485	> 0,522
B	< 25,50	> 0,450	> 0,505
C	< 30,40	> 0,440	> 0,500

1.2.3 Viscosità dinamica

Una bassa resistenza allo scorrimento costituisce un ulteriore elemento di pericolosità del GPL. Infatti, la sua viscosità (cfr. Tabella 1.4 e Tabella 1.7) è inferiore a quella dell'acqua di circa un ordine di grandezza. La viscosità dinamica del GPL è anche

inferiore a quella della benzina. Questa caratteristica lo rende capace di espandersi attraverso fessure o fori piccolissimi.

Per questo motivo è molto importante che tutte le tubazioni, giunzioni, valvole ecc. siano di tipo idoneo, costruite perfettamente e correttamente montate, per non lasciare fessure anche piccole dalle quali potrebbero avvenire perdite di GPL.

Temperatura [°C]	Viscosità dinamica Pa·s
0	$179 \cdot 10^{-5}$
20	$100 \cdot 10^{-5}$
37	$69,1 \cdot 10^{-5}$

Tabella 1.7: Viscosità dinamica dell'acqua

1.2.4 Legame temperatura - pressione

Si consideri ora il legame termodinamico pressione - temperatura e l'influenza della variazione di queste due variabili di stato sulle miscele di gas GPL. Se si analizza la Tabella 1.8 si osserva che al crescere della temperatura aumenta anche la pressione a cui i maggiori componenti del GPL, propano e butano, sono in fase liquida. Analogamente, se aumenta la pressione, come può succedere nel procedimento di compressione per liquefare il GPL, aumenta anche la sua temperatura.

T [°C]	Butano	Propano
0°C	$\simeq 0,2$ bar	$\simeq 4,0$ bar
15°C	$\simeq 1,5$ bar	$\simeq 7,5$ bar
50°C	$\simeq 5,0$ bar	$\simeq 17$ bar

Tabella 1.8: Pressione dei gas del GPL al variare della temperatura

Per quanto riguarda la liquefazione del GPL, essa avviene quindi per compressione o per raffreddamento:

- **compressione**: si sottopone il gas, a temperatura ambiente, a pressioni crescenti, come mostrato in Fig.1.5.

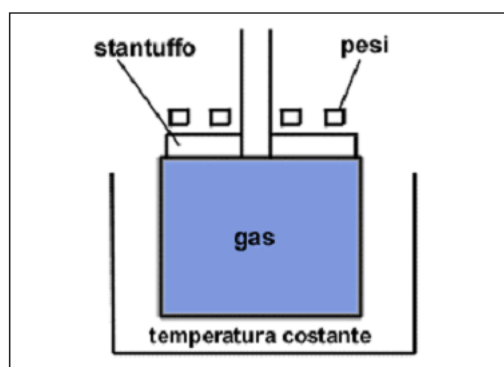


Figura 1.5: Liquefazione per compressione

Nella pratica il GPL gassoso viene pompato entro il contenitore, in questo modo, mano a mano, la pressione nello stesso aumenta; quando P raggiunge un valore tale per cui il gas comincia a trasformarsi in liquido, più gas si immette, più gas si trasforma in liquido.

- **raffreddamento**: a pressione atmosferica il gas si trasforma in liquido al raggiungimento della temperatura di rugiada, cfr. Tabella 1.3. Si noti che, essendo T_{eb} al di sotto dello zero, il GPL (propano puro) viene anche commercializzato come fluido refrigerante, noto come R290. Inoltre a pressione atmosferica è abbastanza semplice liquefare il butano, dato che $T_{eb} = -0,5^{\circ}\text{C}$: basta far passare del butano gassoso in un recipiente immerso in una soluzione a bassa temperatura (Fig.1.6).

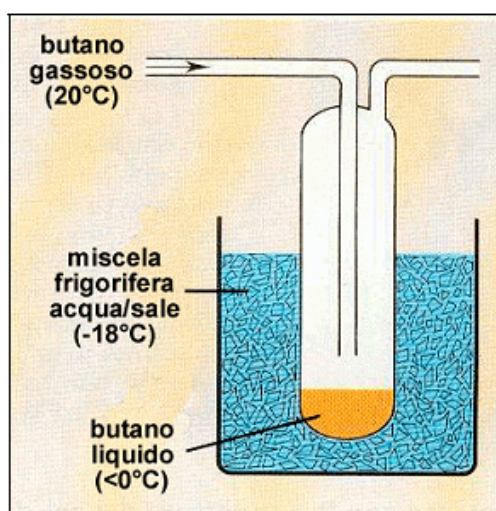


Figura 1.6: Liquefazione del butano per raffreddamento

All'atto pratico una variazione di pressione si può ottenere aprendo la valvola posta sul contenitore di GPL: P all'interno del contenitore diminuisce, pertanto diminuisce anche la temperatura del GPL liquido, che in parte vaporizza.

Si consideri ora l'ipotesi di un brusco innalzamento di temperatura, come, ad esempio, quella che si registra dopo un'esposizione al sole. In questo caso il GPL liquido tende a espandersi molto all'interno nel contenitore, che essendo chiuso, ha volume $V = \text{cost.}$ Il livello della fase liquida si innalza e la pressione all'interno del contenitore aumenta, proprio per effetto dell'aumento della temperatura e dell'impossibilità del liquido di espandersi liberamente. Potrebbe allora succedere che il liquido espanso, sotto la continua azione del calore, venga ad occupare tutto il volume disponibile nel contenitore fino a provocarne la rottura (scoppio per sovrappressione).

Per questa ragione⁴, indipendentemente dal tipo di miscela GPL, i contenitori non vengono mai riempiti completamente di liquido, ma viene lasciato sempre uno spazio di sicurezza che risulterà riempito di gas evaporato dalla fase liquida. Viene dunque definito un **grado di riempimento**, che è normo-regolamentato e di cui in questa analisi si parla nel Capitolo 3 relativo alla sicurezza, a pag. 84.

1.2.5 Potere Calorifico

Tabella 1.9: Potere calorifico inferiore dei componenti del GPL

Potere Calorifico Inferiore				
Sostanza	[kcal/m ³]	[kJ/m ³]	[kcal/kg]	[kJ/kg]
etano	15370	64339	11340	47469
propano	22380	93683	11100	46465
n-butano	29560	123738	10960	45879
propilene	21070	88199	10900	45627
butilene	27190	113817	10960	45879
etilene	14320	59944	11360	47553
acetilene	12360	51739	10480	43869
GPL commerciale	25000	104650	11000	46046

⁴cfr. § sulla tensione di vapore, pag.9

Si prende ora in considerazione un altro parametro molto importante che è il potere calorifico del GPL, ovvero la quantità massima di calore che si può ricavare dalla combustione completa di 1 kg di sostanza combustibile (o 1 m³ di gas) a 0 °C e 1 atm. Si attendono i seguenti valori di potere calorifico inferiore⁵:

$$H_i = 10.857 \div 11.010 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \simeq 46 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Si osserva che il potere calorifico è praticamente uguale a quello della benzina se si esprime in megajoule per chilo di combustibile; tuttavia i valori saranno molto diversi se espressi in kilocalorie per litro di combustibile liquido a 15 °C. La differenza è imputabile alla diversa densità tra il GPL e la benzina, infatti in media, la densità a 15 °C del GPL è di 0.555 kg/l e quella della benzina di 0.730 kg/l come precedentemente trattato a pag. 9.

1.2.6 Numero di Ottano

Il numero di ottano, ovvero l'indice della resistenza alla detonazione o caratteristica antidetonante di un carburante, è pari a 99. Più alto è il numero di ottano, maggiore è il potere antidetonante del carburante: questo significa un rischio inferiore di combustione anomala (appunto la detonazione). La benzina in commercio ha numero di ottano 95, sulla base dell'apposita specifica, anche se attualmente diverse compagnie petrolifere propongono con sovrapprezzo carburanti con numero di ottano pari a 98-101.

1.2.7 Idoneità materiali

Per quanto riguarda l'azione chimica dobbiamo osservare che i GPL non sono corrosivi rispetto ai materiali metallici, quindi non danneggiano i serbatoi, le tubazioni ed i dispositivi d'impianto.

Tuttavia scioglie i grassi e attacca la gomma naturale. E' indispensabile quindi utilizzare solamente guarnizioni e tubi flessibili di gomma sintetica o altro materiale idoneo come previsto dalle norme UNI CIG, di cui a lato.

⁵vale anche a 15°C e 101325 Pa:

$$H_i = 23.900 \div 25000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$$

- Le caratteristiche dei tubi flessibili di acciaio inox sono descritte nella norma UNI 9891.
- Le caratteristiche dei tubi flessibili non metallici sono descritte nella norma UNI 7140.
- Le caratteristiche di portagomma e fascette stringitubo sono descritte nella norma UNI 7141.

1.2.8 Conducibilità

- Conducibilità termica in fase liquida a 15°C [4]:

$$\lambda_T = 13 \cdot 10^{-2} \left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right]$$

- Conducibilità elettrica in fase liquida (a 0° ÷ 20°C) del propano:

$$\lambda_{el} = 0,1 \div 0,5 \cdot 10^{-12} [\Omega^{-1} m^{-1}]$$

- Conducibilità elettrica in fase liquida (a 0° ÷ 20°C) del butano:

$$\lambda_{el} = 1 \div 5 \cdot 10^{-12} [\Omega^{-1} m^{-1}]$$

1.2.9 Solubilità

La solubilità in acqua del GPL è trascurabile. Il propano è solubile in alcool, etere, cloroformio e benzene; ha quindi buone proprietà di solvente a temperatura ordinaria.

1.2.10 Caratteristiche olfattivo-visive e tossicità

I GPL allo stato naturale non hanno odore, vengono pertanto odorizzati al fine di renderne rilevabile la presenza già a concentrazioni inferiori al limite inferiore d'inflammabilità (cfr. Tabella 1.11 a pag. 39), ai sensi della legge 6.12.1971 n. 1083. L'odorizzazione del gas deve essere realizzata secondo la norma UNI 7133 (gas combustibili) e secondo UNI EN 589 (GPL per autotrazione).

I vapori sono invisibili ma l'espansione del liquido produce nebbia in presenza di aria umida.

Il GPL non è considerato tossico [4] ma l'accumulo di vapori in ambienti confinati può produrre asfissia (per carenza di ossigeno). E' inoltre un prodotto leggermente inebriante.

La rapida evaporazione del prodotto in fase liquida a contatto con gli occhi e con la pelle causa ustioni da freddo.

Non esistono evidenze relative ai seguenti effetti:

- tossicità cronica
- potere sensibilizzante
- cancerogenesi
- mutagenesi
- teratogenesi

Prodotti di decomposizione pericolosi

Come tutti gli altri combustibili fossili, queste miscele necessitano per bruciare dell'ossigeno dell'aria e sviluppano prodotti di combustione, tra i quali CO_2 e CO . Ecco perciò la necessità di un adeguato ricambio d'aria nell'ambiente ove sono utilizzati onde evitare che, per insufficienza d'ossigeno, occorranو fenomeni di asfissia o si provochi lo spegnimento della fiamma con conseguente pericolosa fuoriuscita di gas non combusto dai bruciatori.

E' molto importante osservare che in carenza di ossigeno, per insufficiente aerazione, ventilazione o scarico dei fumi, può produrre CO (monossido di carbonio), gas fortemente tossico.

Pertanto possono verificarsi casi di avvelenamento, anche mortali, quando in ambienti ristretti non sufficientemente areati o non dotati di appropriate installazioni per lo scarico dei fumi, vengano tenuti in funzione fornelli, scaldabagni, stufe o comunque apparecchi a combustione.

Valori limite per esposizione

- *Protezione respiratoria*: le concentrazioni pericolose per inalazione professionale, oltre alle quali è prevedibile un danno da esposizione sono fornite dalle tabelle elaborate dalla ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, edizione 2001), come segue:

- ✓ TLV-TWA ⁶: concentrazione media ponderata per giornata lavorativa di 8 ore e 40 ore settimanali (esposizione cronica) a cui i lavoratori possono essere esposti ripetutamente per tutta la vita lavorativa senza effetti negativi: **1800 mg/m³ (1000 ppm)**.
- *Per la protezione delle mani*: usare guanti in pelle/crosta e disporre di guanti termoisolanti alla moschettiera per eventuale emergenza.
- *Per la protezione degli occhi*: usare occhiali schermanti, visiera o schermo facciale a protezione da spruzzi di liquido.
- *Per la protezione della pelle*: usare indumenti antistatici completi, atti a coprire anche gli arti superiori e inferiori.
- *Controllo dell'esposizione ambientale*: non vi sono evidenze in materia.

1.2.11 Impatto ambientale

Non sono disponibili dati di ecotossicità e di biodegradabilità a causa dell'elevata volatilità del prodotto che, non persistendo nel mezzo acquoso, non consente di portare a termine i test [4].

Il prodotto rilasciato in grandi quantità nell'ambiente può aumentare il contenuto nell'aria di composti volatili organici (V.O.C.). Sono quindi da evitare i rilasci, effettuando la movimentazione a ciclo chiuso. Inoltre il prodotto risulta classificato in classe di pericolo '0 - generalmente non inquinante delle acque' [10]. Potenziale di riduzione dell'ozono (Ozone Dedpletion Potential): ODP = 0.

In materia di emissioni, derivanti dalla combustione del GPL, sono stati condotti degli studi finanziati da aziende private, cfr. pag. 2.2 [50], e promossi da enti istituzionali, che hanno portato a classificare il GPL come un combustibile a basse emissioni. I gas prodotti dalla combustione del G.P.L. hanno, infatti, un basso contenuto sia di sostanze inquinanti che di gas serra. Inoltre il benzene e gli idrocarburi policiclici aromatici sono completamente assenti nel GPL. Il tema delle emissioni da autotrazione è stato approfondito nella sezione dedicata in appendice a pag. 209.

⁶TLV = Threshold Limit Value o valore limite di soglia, TWA (time-weighted average)

1.3 Caratteristiche di infiammabilità

Le caratteristiche di infiammabilità del GPL sono di fondamentale importanza per questa trattazione e pertanto vengono approfondite nel seguito.

E' noto che, con limiti d'infiammabilità, si intendano le concentrazioni massima e minima, espresse usualmente in percentuale di volume, del vapore prodotto da un liquido infiammabile che permettono la combustione della miscela con un comburente. Queste due concentrazioni, **limite inferiore di infiammabilità (Li)** e **limite superiore di infiammabilità, (Ls)**, definiscono al loro interno un intervallo (detto campo di infiammabilità) in cui può avvenire la combustione della miscela gas combustibile - ossidante.

I Limiti di infiammabilità, quindi, sono una proprietà fisica riferibile solo ai gas ed ai liquidi infiammabili.

Si è già detto che il propano e il butano sono i principali componenti che vengono usati in diversi rapporti di miscelazione: differenti miscele di GPL hanno dunque caratteristiche chimico fisiche differenti che possono implicare un differente comportamento nell'impiego.

Anche le caratteristiche di infiammabilità possono essere diverse secondo il rapporto di miscelazione. Nel seguito si esaminano innanzitutto le caratteristiche di infiammabilità dei componenti principali del GPL, presi singolarmente; successivamente sono riportati alcuni esempi di calcolo dei limiti di infiammabilità di diverse miscele.

E' inoltre importante precisare che con **pressione di esplosione** si intende la pressione massima raggiunta in un reattore chiuso in seguito all'innesco di una miscela di GPL e ossidante (tipicamente aria) all'interno del campo d'infiammabilità.

1.3.1 Etano

- **Infiammabilità in aria:** le diverse determinazioni dei limiti di infiammabilità, a seconda della direzione di propagazione della fiamma, sono riassunte nella Tabella in figura 1.7. I limiti attualmente assunti sono 3-12,4 % in volume che corrispondono a 41 e 190 mg/l.
- **Influenza della temperatura e della pressione:** Van den Schoor e coll. [17] hanno valutato l'influenza della temperatura e della pressione sul limite superiore dell'etano (Fig. 1.8 e 1.9);

- **Infiammabilità in ossigeno:** i limiti con propagazione della fiamma verso l'alto, determinati in un reattore di 2 cm di diametro, aperto all'estremità inferiore, sono 3-66% in volume;
- **Temperatura di autoaccensione:** Zabetakis [13] riporta 515°C in aria.
- **Energia minima di accensione:** il valore riportato da Britton è 0,24 mJ [21].

Figura 1.7: Limiti d'infiammabilità dell'etano in aria

Dimensioni del reattore, cm		reattore	Limiti, % vol.	
Propagazione della fiamma verso l'alto				
Diametro	Lunghezza		Li	Ls
7,5	150	chiuso	3,12	14,95
5	150	chiuso	3,15	14,8
5		aperto	3,22	12,45
5		aperto	3,1	12,50
5		aperto	2,9	12,50
Propagazione orizzontale della fiamma				
7,5	150	chiuso	3,15	12,85
5,0	150	chiuso	3,22	11,75
Propagazione della fiamma verso il basso				
7,5	150	chiuso	3,26	10,15
5,0	150	chiuso	3,22	10,0

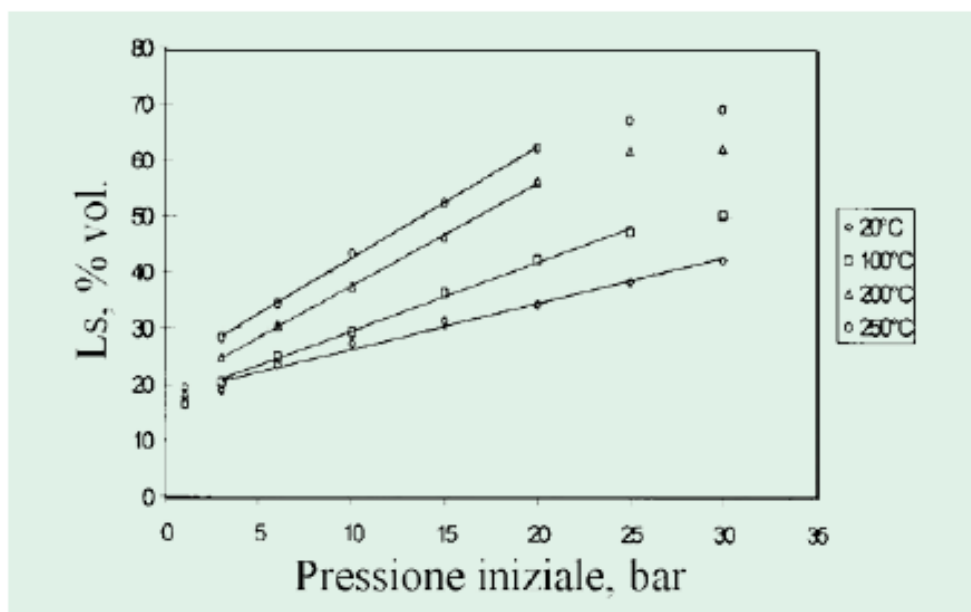


Figura 1.8: Variazione del Ls dell'etano in funzione della temperatura e della pressione

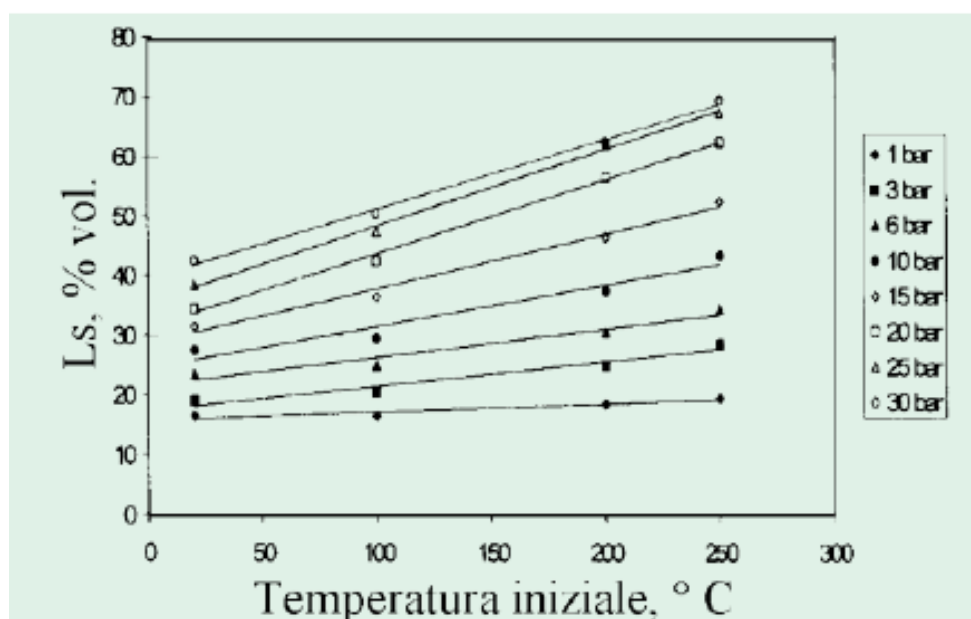


Figura 1.9: Variazione del Ls dell'etano in funzione della temperatura e della pressione

1.3.2 Propano

- **Infiammabilità in aria:** i limiti d'infiammabilità del propano in aria sono stati determinati dal Bureau of Mines in un reattore verticale di 5 cm di diametro con

propagazione della fiamma verso l'alto e sono risultati pari a 1,9-9,5 % in volume [13].

- **Influenza della temperatura e della pressione:** l'effetto della temperatura sul limite superiore del propano è riportato da Kuchta [22]: 9,5 % a 25 °C, 12,9 % in volume a 180 °C. I limiti di infiammabilità, in funzione della pressione, sono riportati nella Tabella in figura 1.10. L'effetto della pressione è stato studiato anche da Payman e Wheeler [14] e da Hsieh e Townend [23].

Al di sopra di 12 bar, la curva di Hsieh e Townend si divide in due; l'area tra le due zone è quella delle fiamme fredde.

Van den Schoor e coll. [17] hanno determinato il limite superiore del propano in funzione della pressione (fino a 30 bar) e della temperatura (fino a 250 °C). Le determinazioni sono state condotte in un reattore sferico con un diametro interno di 200 mm; l'innesco era costituito da un filamento di tungsteno portato a fusione (Fig. 1.14 e 1.15).

- **Infiammabilità in ossigeno:** i limiti di infiammabilità del propano in ossigeno, riportati da Coward e Jones [12], sono 2,2-57% in volume.
- **Temperatura di autoaccensione:** il valore riportato da Zabetakis [13] è 450°C.
- **Energia minima di accensione:** in figura 1.19 è riportata l'energia minima di accensione del propano in funzione della concentrazione di ossigeno (miscele propano-aria-azoto diluente) [29]. Il valore più basso è 0,23 mJ.
- **Pressione d'esplosione e velocità massima di aumento della pressione:** la pressione d'esplosione e la velocità di aumento della pressione in funzione della concentrazione di propano sono riportate nella Tabella in figura 1.11 (NFPA [30]). L'effetto della temperatura sui parametri d'esplosione è riportato nella Tabella in figura 1.12 [30], mentre quello del volume del reattore di prova nella Tabella in figura 1.13 [31].

Pressione, bar	Li, % vol.	Ls, % vol.
1	2,2	9,5
6,8	1,9	25,0
13,6	1,9	31,9

Figura 1.10: Limiti d'infiammabilità del propano in funzione della pressione

Propano	Percentuale in vol.				
	3	4	5	6	7
ΔP , bar	5,0	6,3	6,5	5,7	3,3
dP/dt , bar/s	85	163,2	170	93,5	2,4

Figura 1.11: Pressione d'esplosione e velocità di aumento della pressione in funzione della % di propano

Propano 5 % vol.	Temperatura, °C							
	27	38	65	95	120	150	175	200
ΔP , bar	7,1	6,7	6,5	6,0	5,7	5,9	5,1	4,9
dP/dt bar/s	153	155	170	177	187	190	204	214

Figura 1.12: Effetto della temperatura sui parametri d'esplosione

Volume	% propano	ΔP , bar	dP/dt , bar/s
9 l	4,7	8	196
28 l	4,9	8,15	176
370 l	5,0	7,8	111
2,6 m ³	4,7	8,3	99
2,6 m ³	4,8	9,16	167

Figura 1.13: Effetto del volume del reattore sui parametri d'esplosione del propano

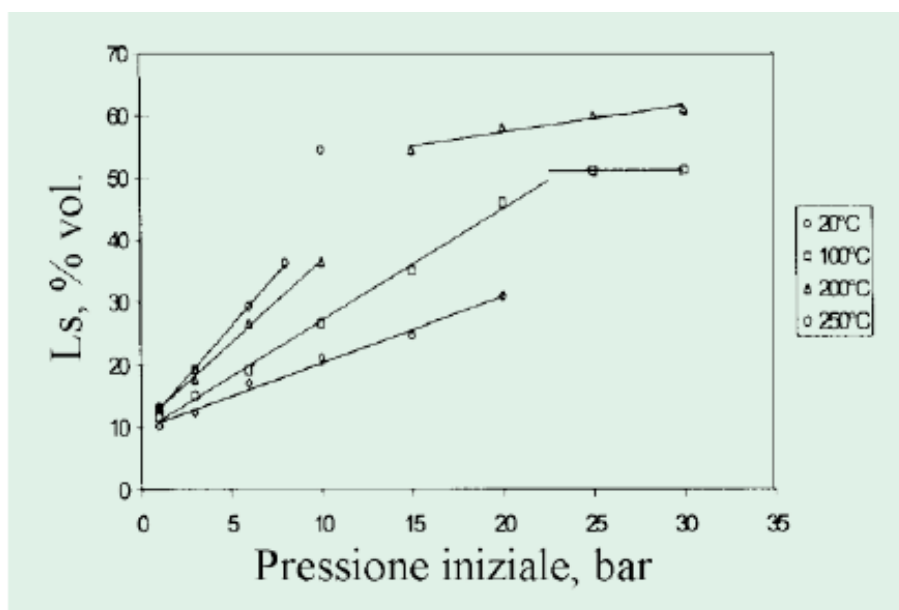


Figura 1.14: Variazione del Ls del propano in funzione della temperatura e della pressione

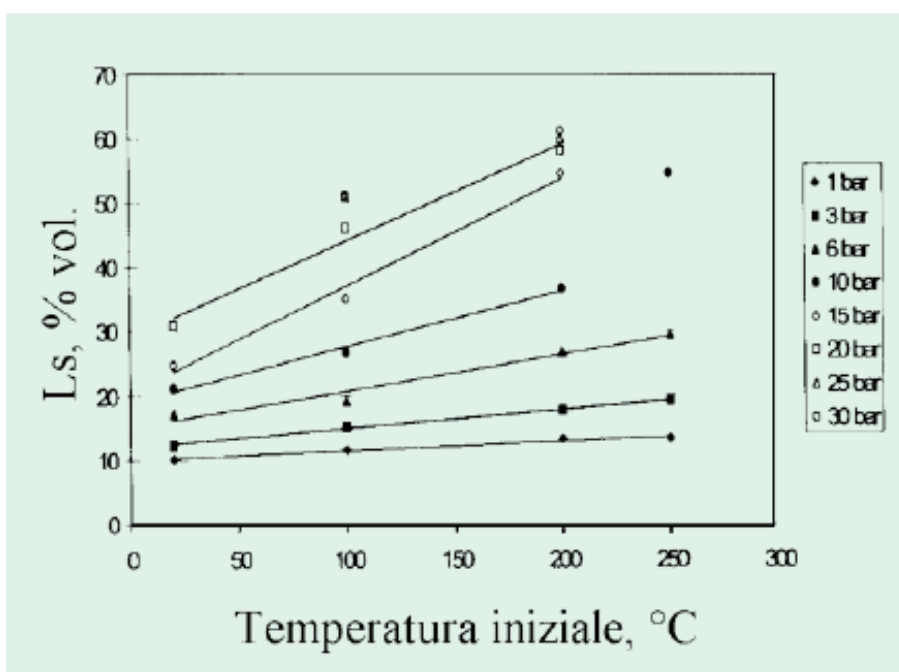


Figura 1.15: Variazione del Ls del propano in funzione della temperatura e della pressione

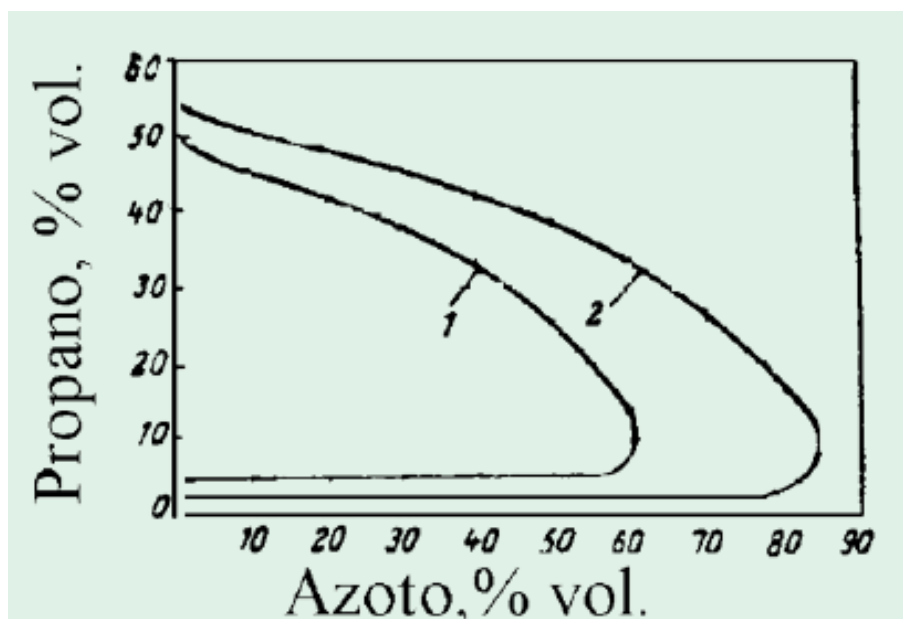


Figura 1.16: Diagrammi d'infiammabilità del propano in cloro (1) e ossigeno (2)

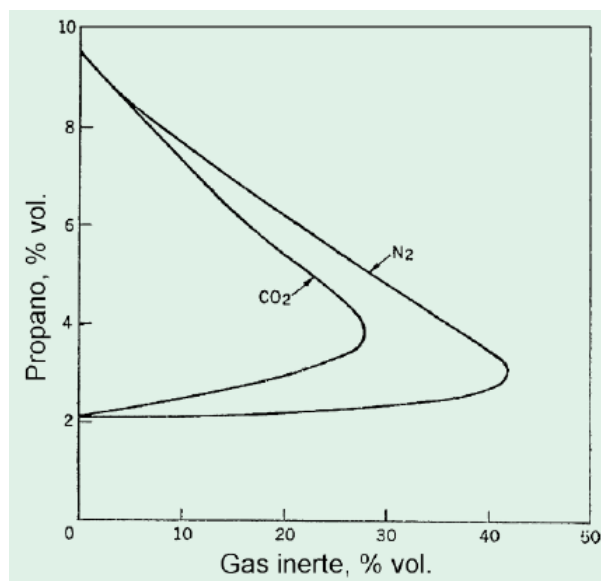


Figura 1.17: Diagrammi d'infiammabilità del propano con l'azoto e l'anidride carbonica

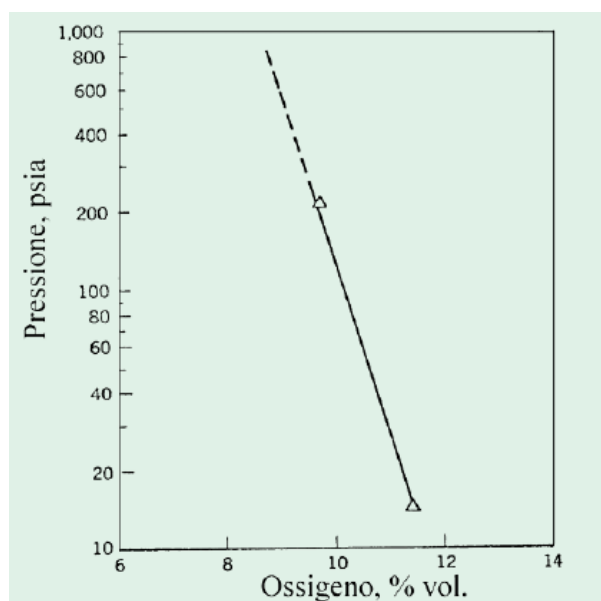


Figura 1.18: Variazione dell'ossigeno di sicurezza del propano in azoto come diluente in funzione di P

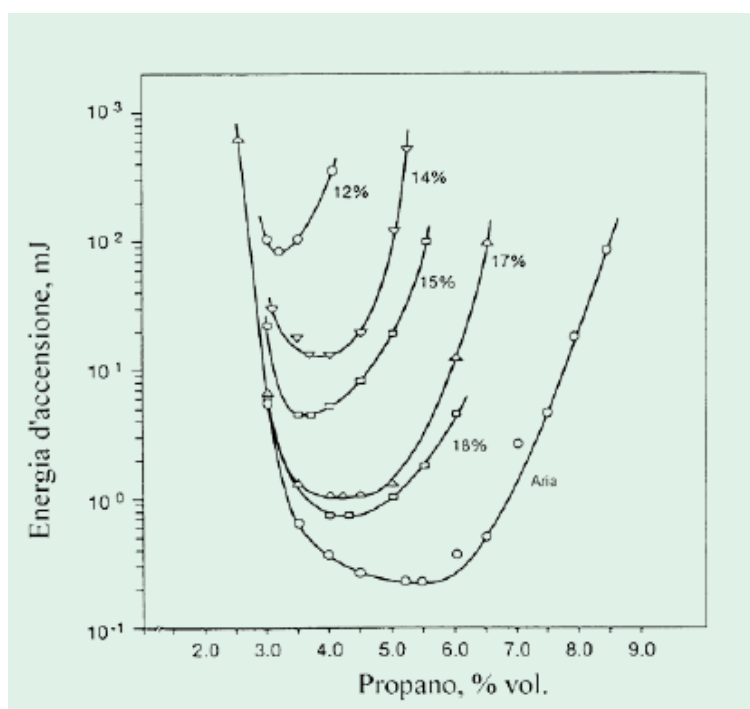


Figura 1.19: Energia minima del propano in funzione della concentrazione d'ossigeno

1.3.3 Propilene

- **Infiammabilità in aria:** i limiti di infiammabilità del propilene in aria con propagazione della fiamma verso l'alto, determinati in un reattore di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono 2,4-10,3 % in volume volume [25]. Altre determinazioni sono riportate nella Tabella in figura 1.20 [12]. I limiti normalmente accettati sono 2,0-11,0.
- **Influenza della temperatura:** Hoffmann e Kappler [33] hanno ottenuto i risultati riportati nella Tabella in figura 1.21.
- **Infiammabilità in ossigeno:** i limiti di infiammabilità del propilene in ossigeno con propagazione della fiamma verso l'alto, determinati in un reattore di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono 2,1-53 % vol.
Hoffmann e Kappler [33] hanno studiato l'influenza della temperatura in ossigeno e hanno ottenuto i risultati riportati nella Tabella in figura 1.22.
- **Pressione d'esplosione:** Pekalski e coll. [34] hanno determinato la pressione d'esplosione del propilene in aria in funzione della pressione iniziale (Fig. 1.24), in ossigeno a temperatura e pressione ambiente (Fig. 1.25) e, sempre in ossigeno, a 5 bar e temperatura ambiente (Fig.1.26).
- **Temperatura di autoaccensione:** Zabetakis [13] riporta 455 °C in aria e 423 °C in ossigeno.

Dimensioni del reattore, cm		Limiti, % vol.	
Diametro	Lunghezza	Inferiore	Superiore
<i>Propagazione della fiamma verso l'alto</i>			
10,2	96	2,0	11,1
7,5	150	2,18	9,7
5,0	150	2,21	9,6
<i>Propagazione della fiamma orizzontale</i>			
7,5	150	2,22	9,3
5,0	150	2,26	8,4
<i>Propagazione della fiamma verso il basso</i>			
7,5	150	2,26	7,4
5,0	150	2,29	7,2

Figura 1.20: Limiti d'infiammabilità del propilene in aria

Temperatura, °C	Li, % vol.	Ls, % vol.
20	2,35	11,0
100	2,17	12,35
200	2,08	13,35
300	1,92	15,25

Figura 1.21: Influenza della temperatura sui limiti d'infiammabilità del propilene

Temperatura, °C	Li, % vol.	Ls, % vol.
20	2,25	54,5
100	2,14	56,5
200	2,08	57,5
300	1,92	

Figura 1.22: Influenza della temperatura sui limiti d'infiammabilità del propilene in ossigeno

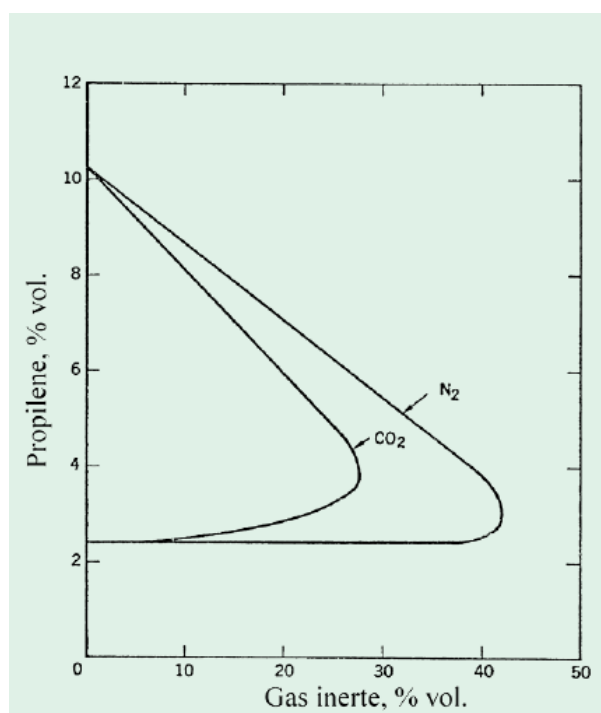


Figura 1.23: Diagrammi d'infiammabilità del propilene

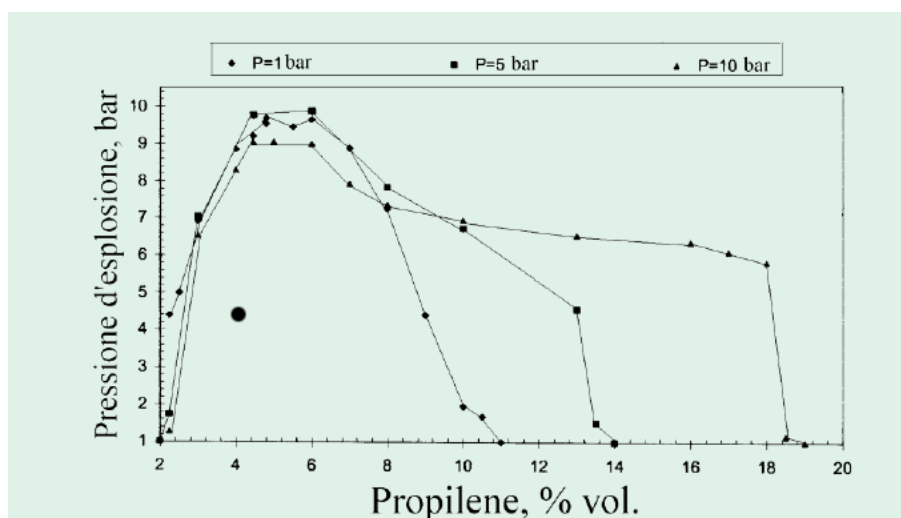


Figura 1.24: Pressione d'esplosione in funzione della pressione

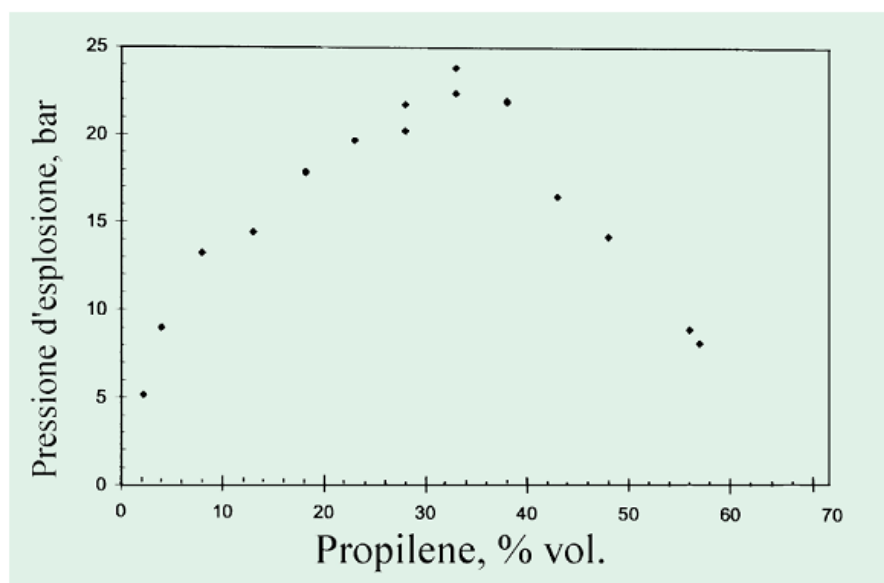


Figura 1.25: Pressione d'esplosione del propilene in ossigeno a temperatura e pressione ambiente

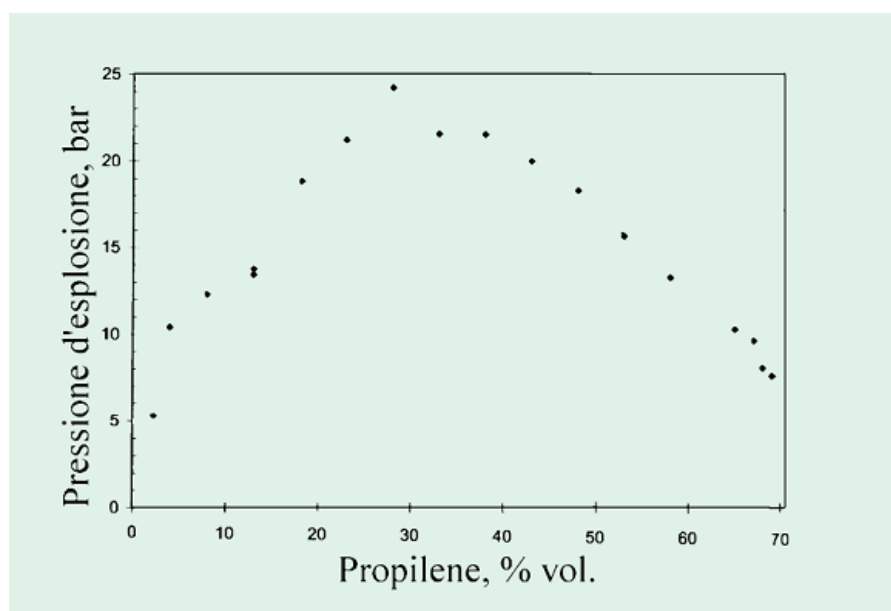


Figura 1.26: Pressione d'esplosione del propilene a 5 bar e temperatura ambiente

1.3.4 Butano

- **Infiammabilità in aria:** i limiti del butano in aria, con propagazione verso l'alto in un tubo di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono 1,86-8,41 % in vol [17]; 1,85-8,10 in vol. [35] e in un tubo di 5,3 cm di diametro 1,93-9,05 % in vol [36] . I limiti normalmente accettati sono 1,85-9 % in volume [13].
- **Influenza della temperatura e della pressione:** La Fig. 1.28 riporta la variazione del Ls del n-butano in funzione della temperatura e della pressione [24]. La miscela al 40 % di butano a 250 °C e 6 bar si autoaccende.

La Fig. 1.29 riporta la variazione del Ls del n-butano in funzione della pressione e della temperatura [24].

L'effetto della temperatura sul limite superiore del butano è riportato anche da Kuchta [22]: 8,4 % a 25 °C, 9,9 % in volume a 120 °C, 10,6 % in volume a 180 °C.

Scott e coll. [18] e Dalmai [37] hanno invece determinato l'intervallo di infiammabilità del n-butano a pressione ridotta.

- **Infiammabilità in ossigeno:** i limiti di infiammabilità del butano, con propagazione verso l'alto in un tubo di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono 1,85-49 % [12].

- **Temperatura di autoaccensione:** la NFPA[40] riporta 287 °C.
- **Pressione d'esplosione e velocità massima di aumento della pressione:** nella Tabella in figura 1.27 sono riportati i dati della NFPA [30].

<i>n</i> -Butano	Percentuale in vol.			
	3	4	5	6
ΔP , bar	4,9	6,6	6,6	4,8
dP/dt , bar/s	48,7	143	156	17,4

Figura 1.27: Pressione d'esplosione e velocità massima di aumento di pressione

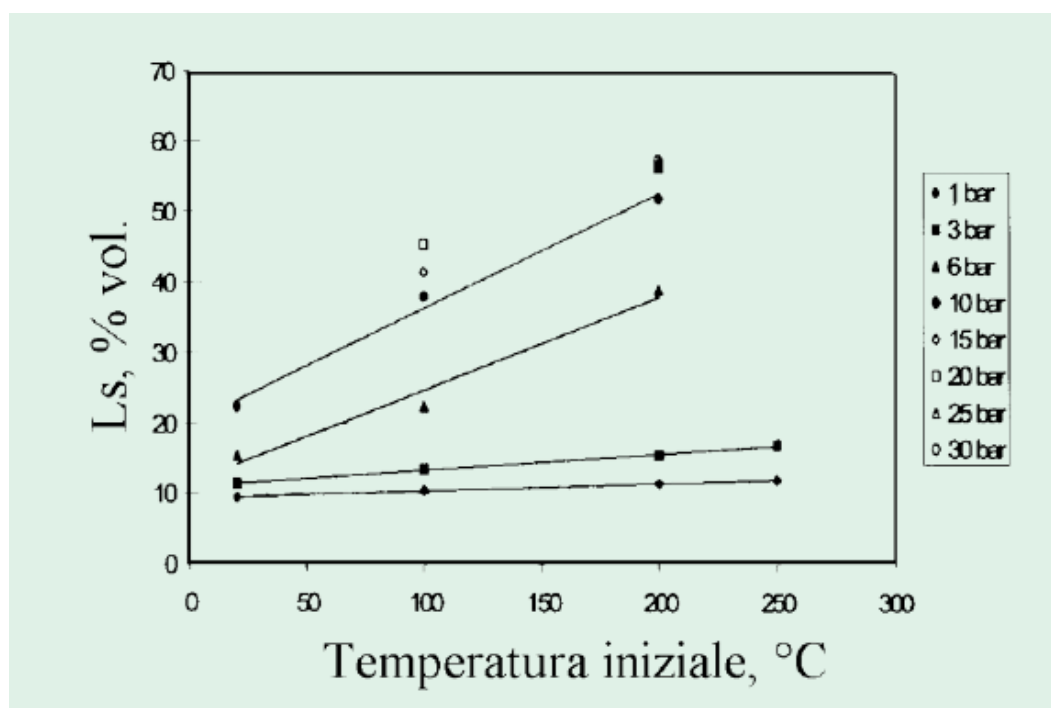


Figura 1.28: Variazione del Ls del n-butano in funzione della temperatura e della pressione

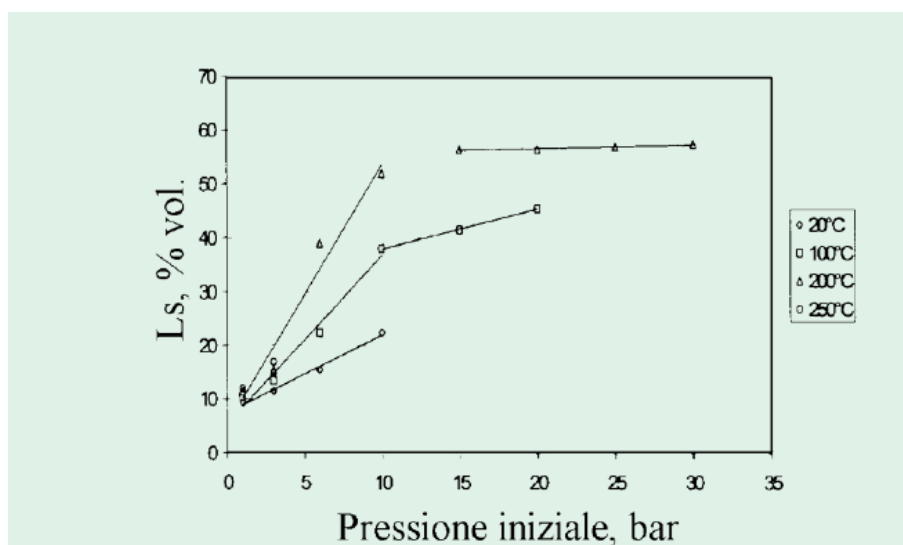


Figura 1.29: Variazione del L_s del n-butano in funzione della pressione e della temperatura

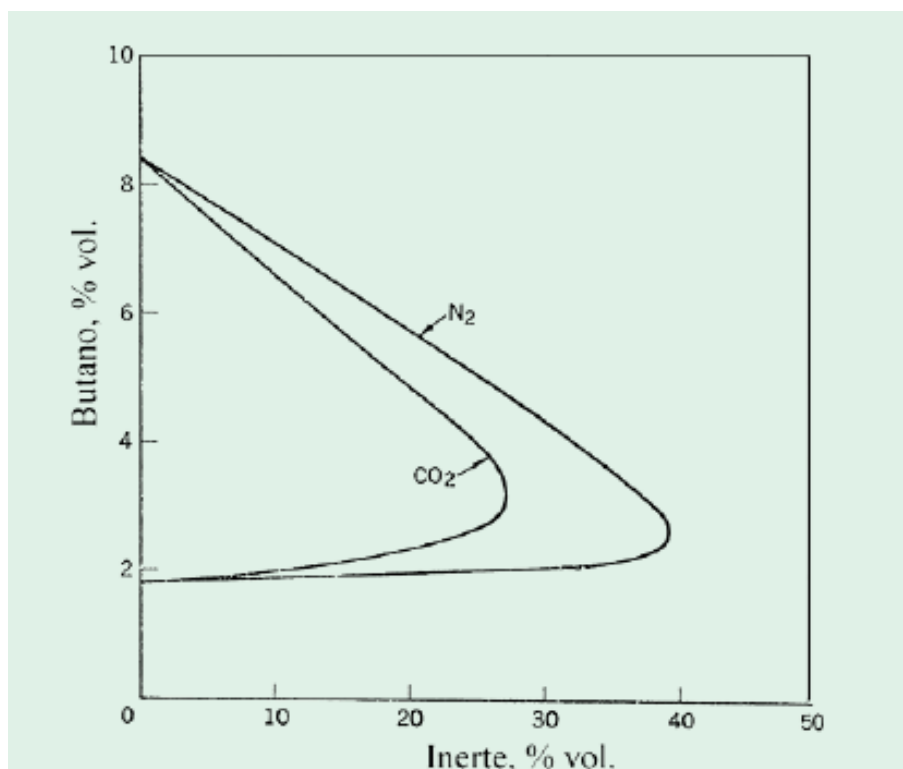


Figura 1.30: Diagrammi d'infiammabilità del n-butano

1.3.5 Butileni

Ossidante	Temperatura	Li, % vol.	Lo, % vol.
Aria	20	1,80	10,58
Ossigeno	20	1,80	57,50
Aria	100	1,75	12,10
Ossigeno	100	1,74	60,50
Aria	200	1,46	15,23
Ossigeno	200	1,46	63,50
Aria	300	1,15	16,25
Ossigeno	300	1,21	

Figura 1.31: Limiti d'infiammabilità dell'1-butene in aria e in ossigeno in funzione della temperatura

- **Infiammabilità in aria:** i limiti di diversi butileni in aria con propagazione di fiamma verso l'alto, determinati in un reattore di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono rispettivamente [12]:

- ✓ 1-butene 1,65-9,35 % in volume;
- ✓ 2-butene 1,85- 9,70 % in volume;
- ✓ isobutilene 1,78-8,85 % in volume.

Zabetakis tuttavia [13] riporta i seguenti dati: 1-butene 1,6- 10 in aria e 1,7-58 in ossigeno; 2-butene 1,7-9,7 in aria e 1,7-55 in ossigeno.

- **Influenza della temperatura e della pressione:** Hoffmann e Kappler [33] hanno determinato i limiti di infiammabilità dell'1-butene in aria e in ossigeno in funzione della temperatura. I risultati sono riportati nella tabella in figura 1.31
- **Temperatura di autoaccensione:** i valori di Zabetakis [13] sono riassunti nella Tabella in figura 1.32.

	Temp. Autoaccensione, °C
1-butene	380 (310 in O ₂)
2-butene	320
isobutilene	465

Figura 1.32: Temperature di autoaccensione dei butileni

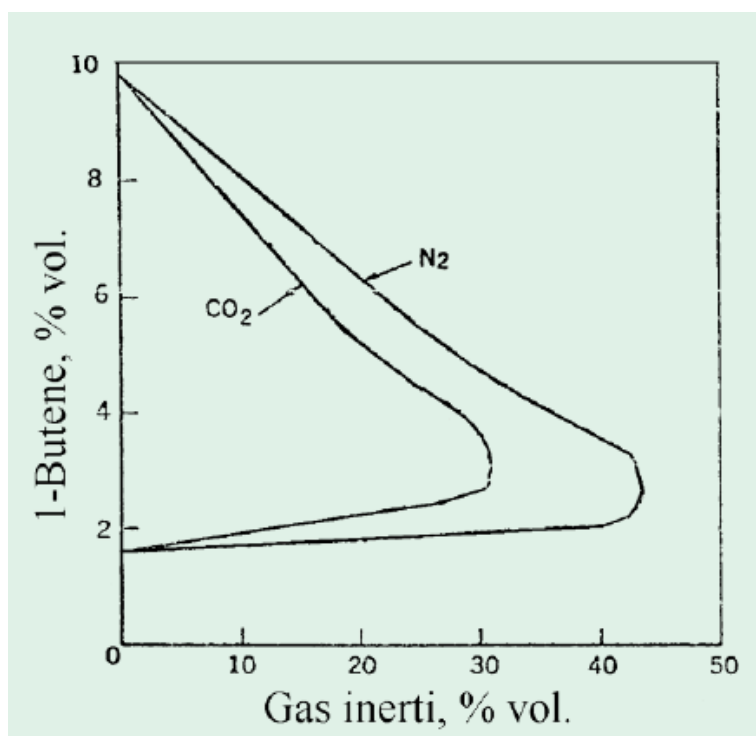
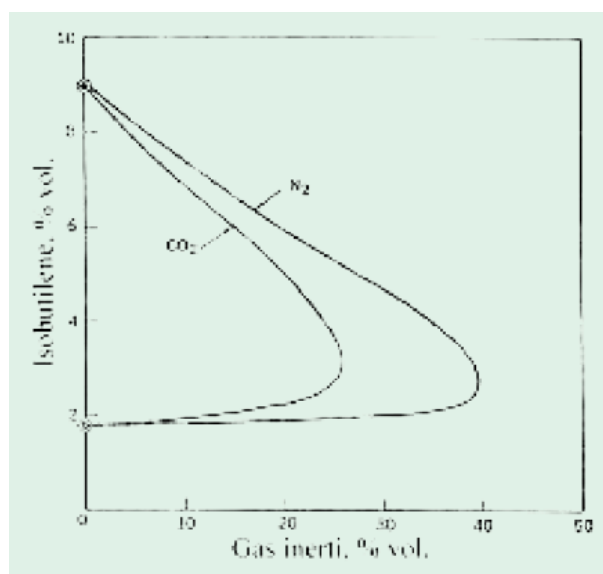


Figura 1.33: Diagrammi d'infiammabilità del 1-butene

Figura 1.34: Diagrammi d'infiammabilità dell' isobutilene con N₂ e CO₂

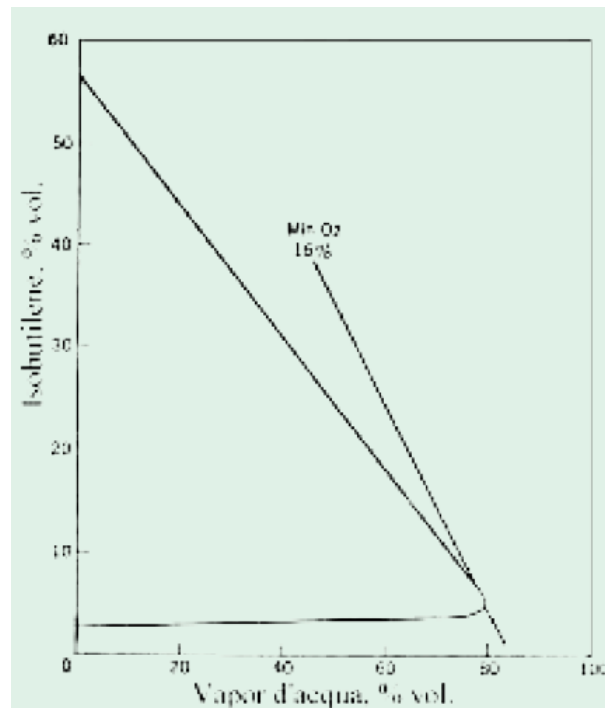


Figura 1.35: Diagrammi d'infiammabilità dell' isobutilene con vapor d'acqua

1.3.6 Isobutano (dimetil-propano)

- **Infiammabilità in aria:** i limiti con propagazione della fiamma verso l'alto, determinati in un reattore di 5 cm di diametro e alto 180 cm, sono 1,83-8,43 in volume [42].
- **Infiammabilità in ossigeno:** i limiti determinati in un reattore di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono 1,8-48 % in volume [12].

1.3.7 Pentano

- **Infiammabilità in aria:** nella Tabella in figura 1.36 sono riportati i limiti di infiammabilità del pentano in funzione della direzione di propagazione della fiamma, determinati da White [44].
I limiti generalmente accettati sono 1,4-7,8 % vol. [12].
- **Influenza della temperatura:** White [44] ha trovato che il limite inferiore del pentano in aria, con propagazione della fiamma verso il basso, in un reattore chiuso

di 2,5 cm di diametro e alto 150 cm diminuisce linearmente da 1,53 % a 17 °C a 1,22 % a 300 °C mentre il limite superiore varia linearmente da circa 4,5 % a 17 °C a 5,35 a 300 °C.

Secondo Kuchta [22] il limite superiore varia con la temperatura nel modo seguente: 7,8 % a 25 °C, 8,8 % a 100 °C e 13,8 % a 200 °C.

- **Energia minima di accensione:** l'energia minima è pari a 0,37 mJ [29].

Nella Fig. 1.38 è riportata la variazione dell'energia minima di accensione del pentano in funzione della concentrazione di ossigeno [29].

- **Temperatura di autoaccensione:** Zabetakis [13] riporta 260°C.

Dimensioni del reattore, cm		Limiti di infiammabilità, % vol	
Diametro	Lunghezza	Inferiore	Superiore
<i>Propagazione della fiamma verso l'alto</i>			
7,5	150	1,42	8,0
5,0	150	1,43	8,0
<i>Propagazione della fiamma orizzontale</i>			
7,5	150	1,44	7,45
5,0	150	1,46	6,70
<i>Propagazione della fiamma verso il basso</i>			
7,5	150	1,48	4,64
5,0	150	1,49	4,56

Figura 1.36: Limiti d'infiammabilità del pentano in aria

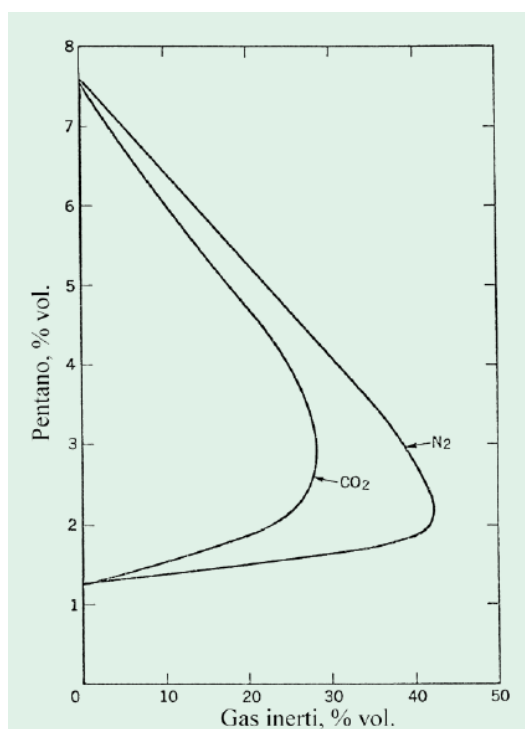


Figura 1.37: Diagrammi d'infiammabilità del pentano

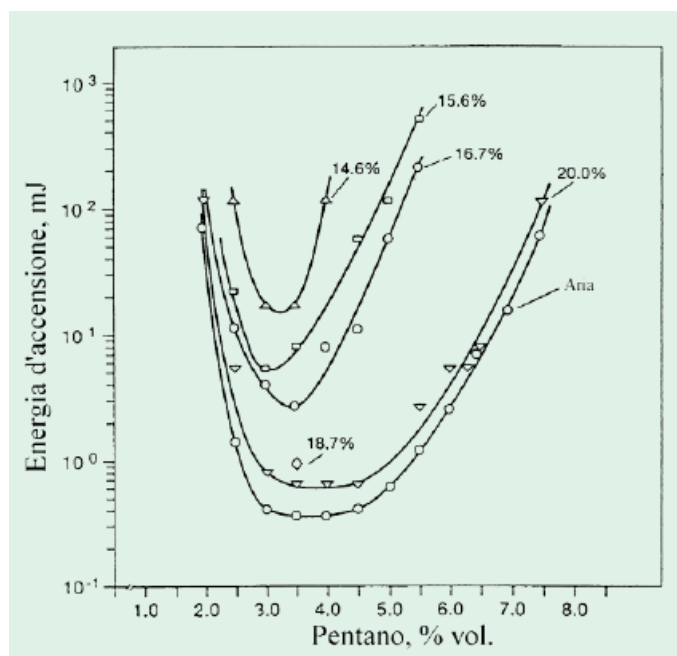


Figura 1.38: Variazione dell'energia minima di accensione del pentano in funzione della % d'ossigeno

1.3.8 Isopentano

- **Infiammabilità in aria:** i limiti determinati con propagazione della fiamma verso l'alto in un reattore di 5 cm di diametro, aperto in basso, sono 1,35-7,60 % vol. [12].
- **Influenza della temperatura:** i limiti, determinati in un reattore di 2,5 l di volume si allargano da 1,43-4,85 % a 100 °C a 1,1- 5,25 % a 250 °C [12].
- **Temperatura di autoaccensione:** Zabetakis [13] riporta 460 °C.

1.3.9 Limiti d'infiammabilità del GPL

Per descrivere i limiti d'infiammabilità di miscele GPL - aria si è fatto riferimento allo studio sperimentale del 2003 di D.P. Mishra e A. Rahman [45].

In quella sede era stato utilizzato un reattore in vetro (borosilicato) di 5 cm di diametro e lungo 120 cm, aperto in alto. Le miscele da saggiare erano preparate dosando i reattivi (GPL e aria) con flussimetri di precisione in una camera di miscelazione e quindi inviate nel reattore di prova. L'innesco era costituito dalla scintilla generata da due elettrodi in rame. Una miscela era considerata infiammabile se la fiamma si propagava per l'intera lunghezza del tubo.

I limiti sono stati determinati sia con propagazione della fiamma verso l'alto (1,81-8,86 % vol.) che verso il basso (1,87-7,69 % vol.). La stessa apparecchiatura è stata utilizzata anche per determinare la penisola di infiammabilità con azoto come diluente (è necessario aggiungere circa il 35 % di azoto per rendere tutte le miscele non infiammabili).

Il GPL utilizzato, analizzato per gascromatografia, era costituito dal 29 % di butani (n- e iso-) e dal 70 % di propano (miscela 70/30).

È anche possibile calcolare i limiti di infiammabilità delle varie miscele che costituiscono i GPL se si conosce la loro composizione. Infatti, quando il combustibile non è un composto singolo ma una miscela e quindi non si trovano dati sperimentali sui limiti di infiammabilità, si può ricorrere a calcoli che si basano su criteri di additività, partendo dai limiti dei singoli composti.

Una regola molto usata è quella di Le Chatelier [46], che è stata verificata ed applicata per numerose miscele. Sostanzialmente la regola ammette che una miscela omogenea di 'miscele limite' sia essa stessa una miscela limite. L'equazione è la seguente:

$$L_i = \frac{100}{\frac{c_1}{l_1} + \frac{c_2}{l_2} + \dots + \frac{c_n}{l_n}} \quad (1.1)$$

dove L_i = limite inferiore di infiammabilità della miscela in aria; $c_1, c_2, \dots, c_n$ = percentuale di ciascun combustibile presente nella miscela, senza aria né gas inerti, cosicché:

$$c_1 + c_2 + \dots + c_n = 100\%$$

e $l_1, l_2, \dots, l_n$ = limiti inferiori di infiammabilità dei singoli componenti.

Con una equazione analoga si calcola il limite superiore.

Tabella 1.10: Limiti d'infiammabilità dei singoli componenti del GPL

	Li, % vol.	LS, % vol.
etano	3.0	12.4
propano	1.9	9.5
propilene	2.0	11.0
isobutano	1.83	8.43
n-butano	1.85	9.0
isobutene + 1-butene	1.6	9.9
trans 2 butene	1.8	9.7
cis 2 butene	1.70	10
n-pentano	1.4	7.8
isopentano	1.35	7.6

Nella Tabella 1.12 sono riportati, come esempio, le analisi gascromatografiche (Metodo UNI EN 27941) effettuate dalla Stazione sperimentale per i Combustibili su 25 campioni di GPL nel periodo 2003-2004.

Applichiamo ora la regola di LeChatelier alle 25 miscele riportate nella Tabella 1.12, utilizzando come limiti di infiammabilità i valori quotati da Coward e Jones [12] e da Zabetakis [13], riassunti in Tabella 1.10.

I risultati dei calcoli sono riassunti nella Tabella 1.11.

Miscela N.	Li, % vol.	Ls, % vol.
1	1.9	9.5
2	1.9	9.5
3	1.9	9.5
4	1.89	9.48
5	1.90	9.54
6	1.88	9.46
7	1.89	9.44
8	1.93	9.85
9	1.93	9.99
10	1.93	10.10
11	1.94	10.10
12	1.87	9.15
13	1.85	9.18
14	1.85	9.13
15	1.84	9.10
16	1.91	9.64
17	1.85	9.10
18	1.85	9.00
19	1.85	9.00
20	1.85	9.10
21	1.85	9.02
22	1.85	9.00
23	1.86	9.06
24	1.86	9.14
25	1.86	9.07

Tabella 1.11: Limiti d'infiammabilità calcolati delle 25 miscele considerate

Tabella 1.12: Composizione (% in vol.) di alcuni campioni di GPL

Campione N.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
etano	0.1	0.1	0.5	0.6	0.7	-	0.3	0.4	0.2	0.2	0.5	0.4	1.0	1.5	1.3	0.5	0.8	-	-	1.0	0.3	1.2	0.2	0.1	0.1
propano	99.6	96.9	94.6	89.1	87.9	81.9	71.1	68.4	56.5	49.2	46.3	39.1	38	34.6	33.4	33.0	32.4	28.6	27.3	26.8	26.5	25.6	18.6	17.8	16.8
propilene	-	-		1.3	4.7	2.5	7.5	26.7	36.8	44	45.7	3.2	3.9	2.3	1.9	30	1.3	1.0	-	1.7	0.5	0.1	5.9	11.3	7.5
isobutano	0.3	0.9	1.8	3.1	2.7	5	8.2	2.6	3.9	3.7	4.6	19	19.5	21	21.2	13.1	19.2	24.6	22.9	20.8	23.5	20.5	26.7	26	25.7
n-butano	-	0.5	1.7	4.6	3.7	7.0	12.4	1.0	1.1	1.7	1.1	37.3	31.2	33.3	34.2	23.3	40.9	45.4	49.5	43.6	47	50.6	47.6	43.4	49.2
isobutene + 1-butene	-	1.1	0.6	0.6	0.2	1.6	0.1	0.8	1.2	1.0	1.5	0.4	3.4	3.5	2.9	-	2.6	0.1	0.1	3.0	0.9	0.1	0.4	0.6	0.3
trans 2-butene	-	0.1	0.5	0.4	0.1	1.0	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.8	0.8	0.7	-	0.6	-	-	0.7	0.3	-	0.3	0.3	0.2
cis 2-butene	-	0.1	0.3	0.3	-	0.8	-	-	0.1	-	0.1	0.2	0.5	0.5	0.4	-	0.4	-	-	0.4	0.2	-	0.2	0.2	0.1
n-pentano	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.4	-	0.2	-	-	0.2	0.1	0.2	-	-	-
isopentano	-	-	-	-	-	0.2	0.3	-	0.1	0.1	0.1	0.1	1.6	2.3	3.5	0.1	1.6	0.3	0.2	1.8	0.7	1.7	0.1	0.3	0.1

Dall'esame della Tabella 1.11 si può concludere che i limiti di infiammabilità dei GPL sono fortemente influenzati dalle concentrazioni relative di propano, propilene e butani (n e iso).

Le miscele molto ricche in propano (N.1-5) presentano praticamente gli stessi limiti di infiammabilità del propano: 1.9-9.5 % in vol.

Una prima leggera variazione si osserva con la miscela N. 7 in cui la somma dei butani è 20,6 % in vol., per cui i limiti non sono più gli stessi del propano.

L'influenza del propilene si nota molto bene con le miscele N. 8-11: il propilene, con il suo alto valore del limite superiore fa alzare i corrispondenti limiti superiori delle miscele.

Man mano che le miscele diventano sempre più ricche in butani, i corrispondenti limiti d'infiammabilità si avvicinano a quelli del n-butano e dell'isobutano.

Si conclude che i GPL miscelati con l'aria in proporzioni dal 2% al 10% in volume for-

mano una miscela infiammabile che si accende istantaneamente, se innescata, anche con una semplice scintilla (quella ad esempio di un interruttore elettrico), o con una fiamma (quella di un fiammifero o di un fornello), oppure in presenza della resistenza accesa di una stufetta elettrica e della brace di una sigaretta.

Per questo motivo si devono evidenziare eventuali perdite di vapore di GPL con l'impiego di soluzioni saponose, o altri appositi prodotti, e mai con l'uso di una fiamma.

Infine confrontando il campo di infiammabilità, in condizioni standard, del GPL con quello di altri combustibili (Fig. 1.39) si nota l'estensione relativamente ridotta del suo intervallo di infiammabilità.

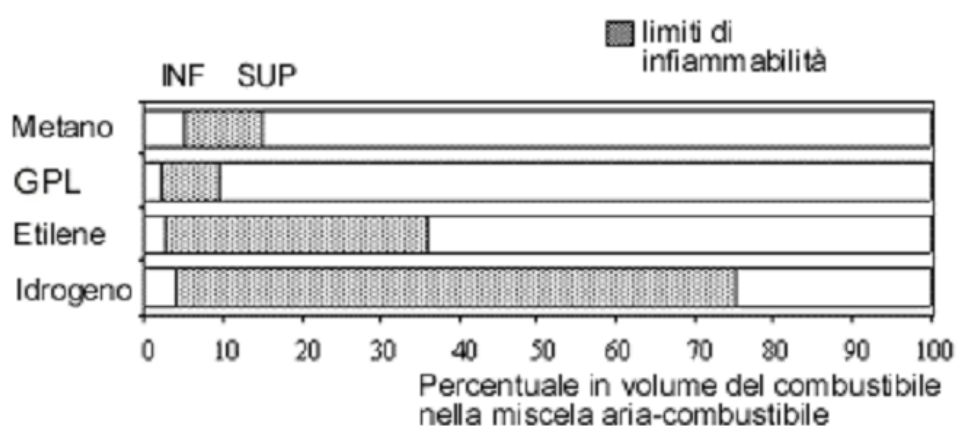


Figura 1.39: Campo d'infiammabilità per miscele aria-combustibile a 1 atm e 25°C [59]

1.4 Produzione del GPL

I GPL possono essere ottenuti:

- **dall'estrazione:** in quanto nei giacimenti petroliferi i gas si trovano associati al greggio, di cui costituiscono oltre il 2%; i gas vengono canalizzati per la necessaria separazione dai liquidi. Analogo è il caso dei giacimenti metaniferi, dove propano, butano e altri gas, come a esempio l'elio, sono commisti al metano e rappresentano circa il 5% del prodotto estratto;
- **dalla raffinazione:** in quanto i processi di raffinazione del greggio producono naturalmente dei gas, che i tecnici definiscono un prodotto fatale, ossia connaturato ai processi chimici attuati. Va da sé che questi prodotti fatali non hanno costi di produzione e, tanto meno, richiedono impieghi energetici. In base alle caratteris-

tiche del greggio e alla struttura della raffineria, si stima la produzione di gas dal 2,5% al 5%, in peso, del greggio trattato (la benzina, per esempio, arriva al 39%).

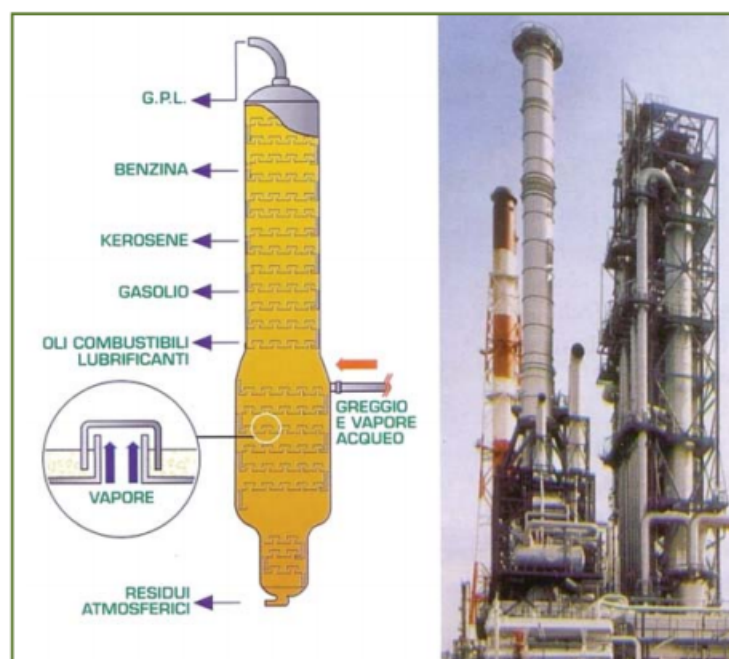


Figura 1.40: Processo di lavorazione dei grezzi in raffineria

Attualmente in Europa il GPL è per circa il 55% estratto da giacimenti di gas naturale⁷ e per il restante 45% derivato dalla raffinazione del petrolio.

In Italia tuttavia il 60% della domanda di GPL è soddisfatto dalle raffinerie nazionali, laddove il restante 40% deriva dalle importazioni e dalla lavorazione del gas naturale. Dando uno sguardo alla seconda fonte di produzione del GPL a livello europeo, il petrolio greggio viene lavorato in raffineria ed inizia il suo percorso di frazionamento entrando in una **colonna di distillazione**. Lo schema di figura 1.41 mostra che la raffineria riceve in ingresso il *crude oil* o greggio e dà in uscita un elevato numero di prodotti, che si dividono dall'alto in basso in **distillati leggeri, medi e pesanti**:

- **incondensabili di raffineria**: sono dei gas leggeri (metano, etano, H₂S, SO₂, N₂, CO₂, O₂, ecc.), generalmente vengono utilizzati dalla raffineria stessa per bruciare nei forni, previo trattamento per eliminare lo zolfo.

⁷Il principale componente del gas naturale è il metano (CH₄), la più piccola e leggera fra le molecole degli idrocarburi. Normalmente contiene anche idrocarburi gassosi più pesanti come etano (CH₃CH₃), propano (CH₃CH₂CH₃) e butano (CH₃CH₂CH₂CH₃), nonché, in piccole quantità, pentano.

- **gas di petrolio liquefatti**: è il GPL, ovvero la miscela d'interesse in questa trattazione;
- **benzina**;
- **solventi**;
- **cherosene**;
- **diesel**;
- **oli combustibili per il riscaldamento, oli lubrificanti, grassi, asfalti e coke**;

Le uscite fino alla benzina esclusa sono classificate come distillati leggeri, pertanto il GPL rientra nella categoria dei **distillati leggeri**.

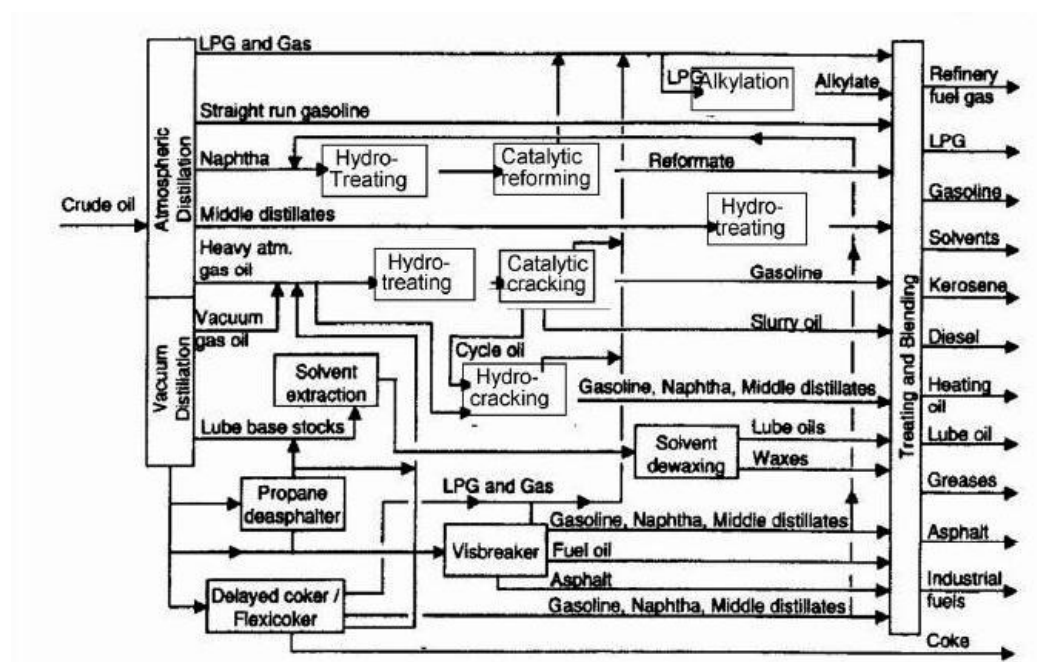


Figura 1.41: Schema di flusso della raffineria [11]

CAPITOLO 2

IMPIEGHI

L'Italia è il Paese Europeo a maggior consumo di GPL [48]. Nel 1993 la domanda complessiva è stata pari a circa 3,5 milioni di tonnellate, soddisfatta per circa 2 milioni di tonnellate dalle raffinerie nazionali e per la parte restante dalle importazioni e dalla lavorazione di gas naturale. La Francia, la Spagna e la Germania allora consumavano rispettivamente 3, 2,5 e 2 milioni di tonnellate di GPL.

Tabella 2.1: Bilancio Energetico Italiano 2008 GPL

BILANCIO ENERGETICO NAZIONALE 2008	
	<i>GPL</i>
Unità di misura	chilotonnellate [kt]
<i>1. Produzioni</i>	2.149
<i>2. Importazioni</i>	1.629
<i>3. Esportazioni</i>	460
<i>4. Variazione scorte</i>	82
5. CONSUMO INTERNO LORDO	3.236

Oggigiorno se per consumi civili l'Italia è tra i primi tre Paesi Europei, lievemente alle spalle della Francia e al pari della Spagna, nei trasporti invece supera tutti; le è seconda l'Olanda con un livello di utilizzo tre volte inferiore. Secondo il Bilancio Energetico Nazionale definitivo più recente, quello del 2008 [49], l'Italia registra un consumo energetico totale annuo di GPL pari a 3236 chilotonnellate, come si può vedere nelle Tabelle

Tabella 2.2: Voci del Bilancio Energetico Italiano 2008 GPL

BILANCIO ENERGETICO NAZIONALE 2008		
		GPL
		chilotonnellate [kt]
<i>6. Trasformazioni (All.1)</i>		
<i>7. Consumi e Perdite (All.2)</i>		42
<i>8. Consumi Finali (All.3)</i>		3.194
	<i>a. Agricoltura</i>	62
	<i>b. Industria</i>	291
	<i>c. Servizi</i>	1.006
	<i>d. Usi domestici e civili</i>	1.835
	Totale (a+b+c+d)	3.194
	<i>e. Usi non energetici</i>	
TOTALE CONSUMI ENERGETICI 7+8		3.236
<i>9. Consumi finali non energetici</i>		
<i>10. Bunkeraggi</i>		
TOTALE IMPIEGHI		3.236

2.1 e 2.2. Per i dati relativi agli ultimi due anni, non definitivi, si confrontino le tabelle 2.6 e 2.7 a pag. 55.

Le imprese che operano nel settore della distribuzione di GPL, sia per uso domestico che per autotrazione, sono circa 500: le statistiche relative all'anno 2008, elaborate a seguito di controlli periodici ed approfonditi sui dati affluiti al data-base 'monitoraggio GPL' del Ministero dello Sviluppo Economico, riportano 495 società totali [49].

Questa polverizzazione dell'offerta nella distribuzione è fortemente ridimensionata dalla presenza di un numero limitato di operatori che dispongono di quote di mercato sensibilmente più elevate dei loro competitori: le prime sette imprese, le sole ad essere presenti in modo più o meno capillare sul territorio nazionale, detengono una quota di mercato aggregata superiore al 50%. Esse sono: Liquigas, Butangas, Agipgas, Socogas, IPEM, ABIBES ed Ultragas.

Nel seguito vengono analizzati gli impieghi più comuni del GPL.

Gli impianti di rifornimento nelle diverse regioni			
Regioni	Distributori GPL*	Regioni	Distributori GPL*
Valle d'Aosta	2	Abruzzo	76
Piemonte	199	Molise	20
Liguria	37	Campania	104
Lombardia	346	Puglia	96
Trentino - Alto Adige	43	Basilicata	22
Friuli Venezia Giulia	46	Calabria	66
Veneto	271	Sicilia	116
Emilia Romagna	275**	Sardegna	41
Toscana	180	Totale Italia	2.311
Marche	125		
Umbria	66		
Lazio	190		

2014 GULCOPI

* Stima Assoliquidi
Consozio Ecogas 2006

** Comprensivo di n. 5 distributori situati nella Repubblica di S. Marino

Tabella 2.3: Stazioni di rifornimento del GPL sul suolo nazionale

2.1 Uso domestico e civile

In tabella 2.2 è possibile notare che alla voce «usi domestici e civili» corrispondono 1835 kt di GPL, cifra tutt'altro che irrisoria dato che costituisce il 58% dei consumi annui di GPL in Italia. Per quanto riguarda l'uso domestico il GPL è quindi largamente impiegato, poichè è un combustibile fortemente concorrenziale. Infatti implica:

- ✓ minore incidenza delle spese di manutenzione degli impianti utilizzatori;
- ✓ elevato potere calorifico;
- ✓ minore costo della kilocaloria rispetto ad altre fonti energetiche;
- ✓ alto grado di purezza;

- ✓ elevata concentrazione di calore;
- ✓ uniformità e precisione nella regolazione delle temperature.

La generale crescita dei livelli di reddito familiare (precedente il 2006), ha consentito il progressivo innalzamento di tutti quegli standard tecnici che rendono possibile il miglioramento della qualità dell'abitare, proiettando nel futuro l'impiego del GPL nell'ambito civile, per il condizionamento estivo degli ambienti e per la generazione di energia elettrica.

- I principali usi residenziali riguardano la **cottura dei cibi e il riscaldamento autonomo**, per il quale sono state raggiunte sicurezza ed economia con l'impiego di **aerotermini**; si tratta di termoconvettori e ventilconvettori che, dotati di camera di combustione stagna, utilizzano come comburente l'aria esterna agli ambienti da riscaldare ed emettono, sempre all'esterno, i residui della combustione, consentendo il riscaldamento dell'aria senza sottrazione di ossigeno e, quindi, senza inquinamento dell'ambiente abitato. In termini economici si ha un indubbio vantaggio dato dalla possibilità di far funzionare non tutti i termoconvettori contemporaneamente, bensì soltanto quelli di uno o più ambienti separatamente.
- Il GPL è utilizzato anche per la **produzione di acqua calda**; a ciò è associata una importante modifica nelle tipologie impiantistiche, con la conseguente crescente tendenza alla diminuzione dell'uso degli scaldacqua a favore di impianti autonomi di riscaldamento combinati (riscaldamento e acqua calda). Gli scaldacqua continuano ad essere, comunque, il sistema più diffuso laddove esistono vincoli tecnico-impiantistici alla installazione degli impianti sopra citati.
- Il GPL viene poi utilizzato per il **condizionamento degli ambienti**, in particolare nei Paesi tecnologicamente più avanzati, dove vengono costruiti palazzi dotati di un adeguato impianto di tale genere. Oggi giorno anche negli edifici del settore terziario come alberghi, supermercati, centri commerciali, la diffusione del condizionamento a GPL ha raggiunto alte percentuali di sviluppo e si può attendere che nel corso dei prossimi anni diventi generalizzato come lo è il riscaldamento a GPL.

La ragione strategica a sostegno della rapida diffusione del GPL nel settore terziario è riconducibile alla capacità di offrire impianti integrati di condizionamento, riscaldamento acqua calda (contro la soluzione caldaia a gasolio e condizionatore elettrico, attualmente molto praticata).

- Il GPL si presta inoltre a **impianti cogenerativi**, che producono simultaneamente due energie utili: meccanica e termica. L'energia meccanica è utilizzata per trascinare macchine (ventilatori, compressori, ecc.) o più frequentemente alternatori per la produzione di energia elettrica. L'energia termica è prelevata direttamente dal circuito di raffreddamento del motore ed è disponibile sotto forma di fluido caldo facilmente utilizzabile: vapore, acqua surriscaldata, aria di essiccazione. Le molteplici caratteristiche delle installazioni dipendono dalle loro finalità. L'impiego del GPL nel settore abitativo può essere estensibile a qualsiasi struttura edilizia privata o collettiva che necessiti di energia elettrica e di calore per riscaldare gli ambienti, tramite sia acqua calda che aria calda.

Il GPL trova dunque impiego nell'ambito strettamente domestico (riscaldamento abitazioni, condomini etc...), ma anche in quello turistico (fornelli a gas da campo), e come già accennato negli edifici del settore terziario.

2.2 Autotrazione e trasporti

Negli ultimi anni, a causa di una crescente presa di coscienza da parte del mondo politico e dell'opinione pubblica, si è concordata l'esigenza di sostituire parte dei consumi dei carburanti tradizionali con quelli a maggiore valenza ambientale ed energetica. Si è dunque presentato il problema di individuare i carburanti alternativi che possano realisticamente interpretare tale ruolo.

Il GPL si pone da subito come uno dei candidati più interessanti per le sue caratteristiche tecniche, ambientali ed energetiche e per avere dimostrato in questi anni di essere un carburante di facile diffusione: basti vedere il parco macchine circolante in Europa e in particolar modo in Italia.

In Italia le autovetture a GPL sono ormai quasi 2 milioni e nel solo ultimo anno sono stati immatricolati ben 300.000 veicoli ad alimentazione mista gpl-benzina. In tabella 2.6 si vede che attualmente il consumo annuo di GPL per autotrazione costituisce più del 30% del consumo totale annuo di tale combustibile.

Per quanto riguarda la rete di distribuzione europea essa conta 13000 stazioni di rifornimento. Queste ultime sono presenti capillarmente nel territorio francese, tedesco, polacco e italiano, tuttavia in Spagna, Portogallo, Austria e Grecia risultano ancora poco diffuse.

Inoltre la rete di vendita di questo prodotto è particolarmente flessibile; i dati sopra menzionati ne sono la prova, poichè i costi d'installazione e d'uso degli impianti di dis-

tribuzione sono tranquillamente paragonabili a quelli degli impianti eroganti carburanti tradizionali (gasolio e benzina).

Una piccola limitazione, che comunque è presente solo in Italia, è rappresentata dal fatto che non è possibile effettuare il rifornimento in maniera autonoma (self service). Pertanto durante le ore notturne e nei giorni festivi non ci si può approvvigionare. Ciò non ha affatto compromesso lo sviluppo e la diffusione di tale tecnologia, dato che, come menzionato in precedenza, il nostro Paese è quello più 'gasato' in Europa. In tabella 2.3 viene riportata la suddivisione dei distributori per regione sul territorio nazionale. Oggi il GPL per autotrazione rappresenta in Europa circa il 2,5% dei consumi dei carburanti. Un suo ulteriore sviluppo non porrebbe problemi d'approvvigionamento, considerata la disponibilità futura di questo prodotto nei Paesi d'interesse (grazie anche ai grandi volumi di produzione in raffineria e di importazione). Anzi, un utilizzo più massiccio del GPL che, vale la pena ripeterlo, è un gas d'origine sia petrolifera sia naturale, può solo contribuire alla diversificazione della rosa dei combustibili e di quella dei Paesi d'importazione dei combustibili stessi.

A differenza di molti altri carburanti alternativi, il costo industriale del GPL permette già adesso un vantaggio economico all'utente, vantaggio che comunque è stato ampiamente enfatizzato negli ultimi anni dagli incentivi, prima per la trasformazione e in seguito per l'acquisto, di vetture a tale alimentazione. Si tenga presente che la campagna d'incentivazione ha riguardato anche la rete di distribuzione.

I veicoli a GPL circolanti ad oggi nell'area europea sono circa 5 milioni e l'Italia è uno dei mercati leader con quasi 2 milioni. Per veicoli si intendono tutte le forme di trasporto leggero o pesante, pubblico o privato ¹, passeggeri o merci, perché la versatilità del GPL non pone vincoli al suo utilizzo.

Per quanto riguarda la tecnologia delle autovetture, notevoli sono stati i passi in avanti ottenuti nella sicurezza dei sistemi d'alimentazione a GPL. Gli impianti a GPL si sono evoluti nella direzione della sicurezza attiva alla pari di quelli a carburanti tradizionali: i nuovi dispositivi installati sui serbatoi di GPL, conformi al regolamento d'omologazione **ECE/ONU67/01**, minimizzano la probabilità di rischio degli eventi incidentali connessi a

¹veicoli privati, taxi, flotte aziendali, distribuzione merci, auto di servizio, bus urbani, bus extraurbani etc...

qualsiasi uso del veicolo.

Tale novità ha portato alla definitiva rimozione del divieto di parcheggio nei garage interrati per i veicoli a gas nuovi, ovvero quelli dotati dei più recenti sistemi di sicurezza, che in Italia sono obbligatori dal gennaio 2001 (D.M. del 22/11/2002).

L'eliminazione del divieto per i veicoli dotati delle nuove tecnologie ha sancito, quindi, il superamento del concetto che aveva impedito la sosta dei veicoli a GPL nei garage interrati e che ancora oggi pesa sulla percezione della sicurezza del GPL: la sua caratteristica di essere più pesante dell'aria.

Si ricorda infatti, come precedentemente introdotto, che in caso di perdita il GPL, una volta raggiunte le condizioni ambiente, gassifica e non si disperde in atmosfera, ma si mantiene in prossimità del suolo.

La sicurezza di un sistema complesso come un veicolo è stata finalmente giudicata non solo in base alle caratteristiche intrinseche del combustibile, ma tenendo in debito conto le tecnologie associate all'uso del carburante, che per il GPL si sono dimostrate particolarmente sicure.

Le prestazioni delle autovetture a GPL sono garantite da sistemi di alimentazione sempre più evoluti che esprimono potenza, coppia, velocità ed accelerazione pari a quelle di un analogo veicolo a benzina, mantenendo un vantaggio ecologico consistente. Come già detto, il GPL offre già oggi un beneficio economico d'uso. Per aumentare l'appeal di questo prodotto ecologico e attrarre quindi un numero importante di utenti, è comunque necessaria una politica di incentivazione finanziaria che abbatta i sovracosti iniziali ed una politica fiscale giusta che aumenti la sua economia d'uso, cosa che per altro al giorno d'oggi si sta verificando.

Attualmente questo tipo di politica di incentivazione è condivisa da praticamente tutte le parti politiche: il GPL, trovando la sua applicazione principe dal punto di vista energetico proprio nella autotrazione, a seguito di un calo dei consumi in questo settore dal 2003 al 2006, ha dunque ricominciato a crescere in termini di utilizzo in maniera molto forte; negli ultimi 3 anni si è registrato un aumento annuo quasi del 10%, come si può osservare in Tabella 2.7 a pag. 55.

Non bisogna poi trascurare il fatto che il GPL possa costituire una risposta energetica

alle problematiche connesse all'inquinamento atmosferico ed alla produzione di gas ad effetto serra: si ricorda che a pari GJ di energia liberata il GPL produce meno CO_2 della benzina. Tale vantaggio in termini di emissioni si mantiene anche rispetto all'intero ciclo di vita del carburante, grazie ai processi di lavorazione stessi del GPL, che sono a minore intensità energetica.

Per quanto riguarda gli inquinanti più preoccupanti per i nostri centri urbani, i veicoli a GPL hanno la capacità di ridurre sia le emissioni di benzene (tipiche dei veicoli a benzina) sia di particolato (tipiche dei veicoli a gasolio), tanto da potersi definire ad emissione zero di PM_{10} e benzene. In materia di emissioni sono stati condotti vari studi, per poter valutare i vantaggi ambientali e sanitari suddetti anche nella prospettiva di una maggiore diffusione del GPL auto rispetto a quello attuale, tra cui:

- un'analisi, realizzata nel 2002, riguardante uno scenario, allora futuribile, di penetrazione del GPL auto a Roma con orizzonte temporale al 2005, condotta da Euromobility con la supervisione scientifica del CNR-IIA [50];
- un programma europeo di prove di emissioni, condotto da quattro autorevoli laboratori europei - TNO (Olanda), IFP (Francia), TUV (Germania) e Millbrook (Inghilterra) - e finanziato da importanti attori industriali ed istituzionali;

Inoltre Euromobility e l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR hanno recentemente concluso un lavoro di aggiornamento della ricerca, condotta nel 2002, sfociata nella pubblicazione del volume [50]. I risultati di questo studio mettono in evidenza le prestazioni del combustibile GPL rispetto ai combustibili tradizionali (benzina e gasolio) con particolare riferimento al PM_{10} e agli inquinanti suoi principali precursori (VOC, NO_x e ammoniaca). Il confronto con i combustibili tradizionali riguarda sia i singoli autoveicoli, sia un caso reale urbano, il Comune di Parma, nel quale l'amministrazione ha avviato una serie di iniziative a favore di GPL e metano in grado di determinare una maggiore penetrazione sul mercato degli stessi. Lo studio, che prende in considerazione l'intero parco veicolare e le relative percorrenze, stima le variazioni delle emissioni in uno scenario di maggiore penetrazione del GPL e rileva come l'uso di carburanti gassosi come il GPL permetta significative riduzioni delle emissioni di PM_{10} , SO_2 e NO_x rispetto alle emissioni prodotte da veicoli diesel e, in misura minore, anche con quelli a benzina. Ciò è trattato nel dettaglio in appendice nella sezione dedicata a pag. 209.

Proprio i comprovati vantaggi ambientali evidenziati, legati all'utilizzo del GPL per autotrazione, hanno indotto la Commissione Ambiente al Senato, nell'ambito della sua

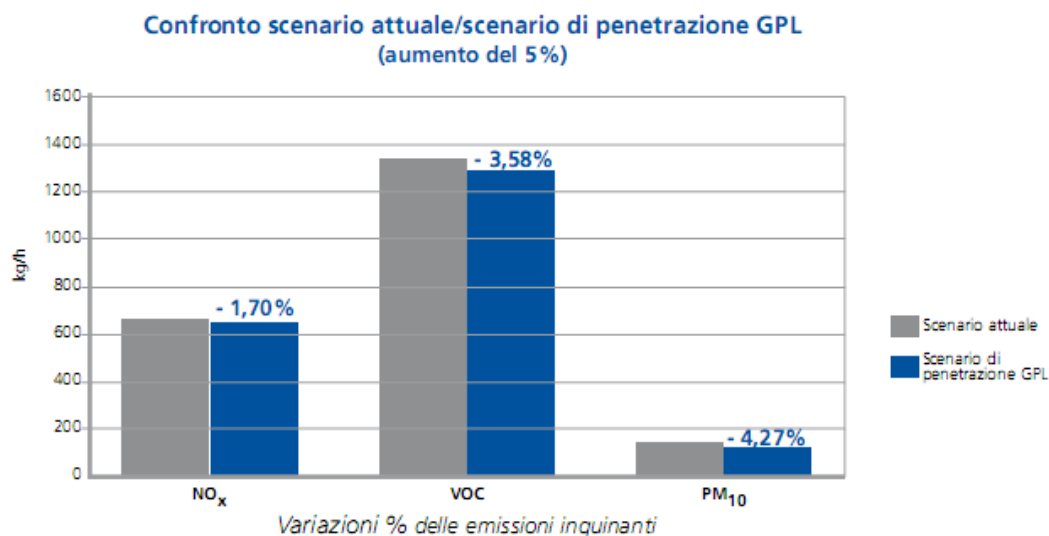


Figura 2.1: Lo scenario mette in evidenza come una strategia di penetrazione che coinvolga anche veicoli diesel (10% dei veicoli interessati) possa determinare interessanti riduzioni per il PM₁₀ (- 4,27%), per i VOC (- 3,58%) e più contenute per NO_x (- 1,70%)

indagine conoscitiva sulle problematiche dell'inquinamento atmosferico nelle aree urbane del 2002, ad attribuire al GPL carburante un ruolo rilevante nella lotta alle emissioni inquinanti da traffico veicolare. Inoltre il piano nazionale di riduzione delle emissioni di CO₂ individua i programmi, in essere e in divenire, di incentivazione in favore del GPL auto come validi strumenti per la diminuzione di produzione di CO₂ nel settore dei trasporti.

Da quanto detto finora si capisce perché l'emergenza ambientale, soprattutto dei centri urbani, non fermi mai il GPL, le cui autovetture sono sempre esentate dalle limitazioni alla circolazione o dalle forme di tassazione anticongestione ed antinquinamento attuate in Italia ed all'estero.

Riassumendo:

- ✓ grazie alle ridotte emissioni inquinanti, è consentito alle auto alimentate a GPL (così come per il metano) di circolare nei centri urbani in caso di blocco del traffico o di targhe alterne;
- ✓ al vantaggio di un maggior rispetto dell'ambiente si aggiunge anche un significativo risparmio di esercizio: in virtù del prezzo, il GPL permette un risparmio anche del 50% sul costo del carburante, considerano anche il leggero maggior consumo su base chilometrica;

- ✓ il GPL è un combustibile diffuso in Europa con numerosi punti di distribuzione.
- ✓ La possibilità di usufruire della doppia alimentazione, grazie alla presenza di un serbatoio suppletivo preposto all'immagazzinamento del GPL, consente di aumentare considerevolmente l'autonomia della vettura.
- ✓ Il GPL, essendo un carburante gassoso, comporta anche una riduzione del rumore rispetto alle alimentazioni tradizionali.

2.2.1 Specifiche ambientali e tecniche

Le specifiche ambientali e tecniche del GPL per uso autotrazione sono definite dalla norma di buona tecnica **UNI EN 589:2000** che si possono esaminare in Tabella 2.4. In Italia viene commercializzata una miscela GPL per autotrazione che ovviamente si attiene a tale norma, come si può notare dalle sue caratteristiche [51] riportate in tabella 2.5.

PARAMETRI	U.M.	LIMITI	
		minimo	massimo
Numero di Ottano		89	
Contenuto Totale Zolfo (dopo odorizzaz.)	ppm in peso		100
Contenuto Totale Dieni	%vol.		0,5
Tensione di vapore calcolata a 40°C	kPa		1550
Tensione di vapore calcolata a temperatura: per grado A per grado B per grado C per grado D	kPa °C	150	-10 - 5 +10
Residuo di evaporazione	mg/kg		100
Solfuro d'idrogeno H ₂ S		negativo	
Corrosione rame	in valutazione	CLASSE 1	
Contenuto di metanolo	mg/kg		2000
Limite di olfattibilità		sgradevole e distinto al 20% del limite inferiore d'infiammabilità	
H ₂ O a 0°C		zero	

Tabella 2.4: UNI EN 589:2000

Tabella 2.5: Miscela GPL italiana per autotrazione

SOSTANZA	QUANTITA'
Idrocarburi più leggeri del C3	0-2%
C3	25-35%
C4	62-72%
C3+C4	97%
C5	0-1%
Più pesanti del C5	Assenti
Olefine	0-30%
Idrogeno solforato	Assente
Zolfo totale(dopo odorizzazione)	100 mg / kg
Piombo	Assente

In Tabella 2.5 si osserva inoltre che, in generale, il GPL italiano è più ricco di butano (C4) ². Si è più volte ripetuto che il propano (C3) presenta migliori qualità motoristiche rispetto al butano e facilita l'avviamento a freddo; di contro è caratterizzato da una densità più bassa che penalizza l'autonomia. Pertanto il GPL italiano, essendo più ricco di butano, conferisce elevata autonomia del veicolo.

2.2.2 Consumi

Per quanto riguarda i consumi di GPL per l'autotrazione, dopo una contrazione del -5% nel 2007 essi sono cresciuti costantemente, fino a raggiungere il +8% nel biennio in corso 2009/2010.

Nel seguito si riportano le Tabelle 2.6 e 2.7 riassuntive dei consumi di GPL e delle variazioni degli stessi, relative agli ultimi nove anni. In esse si evidenzia, tra le altre cose, una variazione positiva nel consumo di GPL per autotrazione del +21,33% dal 2006 al 2010.

²In Italia la maggior parte del GPL proviene dalle raffinerie, e in generale il GPL derivato dalla raffinazione è più ricco di butano ($\simeq 60\%$) al contrario del GPL proveniente dai pozzi

Tabella 2.6: Consumi GPL negli ultimi 9 anni

ANNO	TOTALE CONSUMI [kt]	CONSUMO PER AUTOTRAZIONE [kt]	% AUTOTRAZ.
2002	3719	1313	35,3
2003	3714	1209	32,55
2004	3549	1106	31,16
2005	3528	1029	29,16
2006	3301	989	29,96
2007	3140	944	30,06
2008	3194	1004	31,43
2009	3200	1100	34,38
2010	3300	1200	36,36

Tabella 2.7: Variazione nei consumi di GPL negli ultimi 9 anni

BIENNIO	Variazione Consumi Totali [%]	Variazione Consumi Autotrazione [%]
2002/2003	-0,13462574	-8,602150538
2003/2004	-4,649196957	-9,31283906
2004/2005	-0,595238095	-7,482993197
2005/2006	-6,876704029	-4,044489383
2006/ 2007	-5,127388535	-4,766949153
2007/2008	1,690670006	5,976095618
2008/2009	0,1875	8,727272727
2009/2010	3,03030303	8,333333333

2.3 Usi complementari

A sessanta anni dalla sua introduzione sul mercato italiano, il GPL è chiamato a rispondere ad esigenze diverse di impiego, esigenze che, oltre all'uso domestico per la cottura

dei cibi e il riscaldamento, spaziano dall'agricoltura all'industria, dall'artigianato ai servizi alberghieri ed all'edilizia, dall'autotrazione alla petrolchimica.

2.3.1 Usi agricoli e zootecnici

Nella Tabella 2.2 alla voce «agricoltura» corrispondono 62 chilotonnellate di GPL consumate in un anno in Italia, che corrispondono a ~ 2% dei consumi totali. Nell'agricoltura il GPL viene sfruttato per l'essiccazione dei cereali subito dopo il raccolto, nella climatizzazione e nella concimazione carbonica delle serre.

Ottimi sono i risultati raggiunti anche per l'essiccazione di tabacco, cotone e foraggi.

Il GPL è presente, poi, negli allevamenti avicoli e suinicoli dove serve a creare zone calde che favoriscono una migliore e più rapida crescita degli animali.

Un altro interessante utilizzo in campo agricolo è costituito dal pirodiserbo, quale valida alternativa all'impiego di altri prodotti per la distruzione delle erbe infestanti le colture. La pratica del diserbo termico costituisce una tecnica atta a distruggere i vegetali, o parti di essi, a mezzo del calore prodotto dalla combustione del GPL. Questa applicazione permette di difendere efficacemente la salute dell'uomo e l'ambiente perché elimina i pericoli di inquinamento delle falde acquifere.

2.3.2 Usi industriali

Nella Tabella 2.2 alla voce «industria» corrispondono 291 chilotonnellate di GPL consumate in un anno in Italia, che corrispondono a ~ 9% dei consumi totali. Il GPL è tradizionalmente utilizzato per il riscaldamento dei forni, ad esempio nell'industria ceramica, vetraria, dei laterizi e, ovviamente alimentare, in ragione dell'alto rendimento calorico e della facilità di regolazione. Nell'industria metallurgica, oltre al potere calorifico che in fonderia riduce i costi del 25%, si apprezza la stabilità della fiamma e l'assenza di scorie, specie nelle lavorazioni di ossitaglio e metallizzazione.

Nel settore edile la sua applicazione riguarda in particolare i forni per la preparazione di prodotti speciali bituminosi, l'essiccamento dei laterizi, delle vernici e dei rivestimenti impermeabilizzanti.

Diverse utilizzazioni si verificano anche nell'industria alimentare per la produzione dolciaria e per la panificazione, nell'attività conserviera e nella torrefazione.

2.3.3 Altri impieghi

La molteplicità degli usi consentiti dal GPL nel settore alberghiero e della ristorazione ha contribuito altresì a sviluppare il turismo nelle zone di vacanza: la facilità del suo trasporto, anche in **cartucce**, ha favorito la diffusione di nuovi modi di trascorrere il tempo libero a contatto con la natura, in tenda o in una forma di campeggio più organizzata. Roulotte, campers ed imbarcazioni da diporto sono infatti tutti attrezzati con apparecchiature a GPL.

Di grande attualità è considerato anche l'utilizzo del propano e del butano come propellenti al posto degli ormai fuori legge CFC (clorofluorocarburi) nei più svariati prodotti di largo consumo che vengono nebulizzati (bombolette spray). Data la continua ricerca, non si può ancora dire che il GPL abbia esaurito le sue possibilità di impiego. Infatti, la sua storia è caratterizzata da continue e sempre nuove applicazioni, da più moderni utilizzi e da perfezionamenti di impieghi già conosciuti.

CAPITOLO 3

NORME DI SICUREZZA E STOCCAGGIO DEL GPL

3.1 Introduzione alla normativa sul GPL

La disciplina giuridica riguardante il GPL è costituita da una molteplicità di norme legislative, decreti e circolari ministeriali che regolamentano i principali aspetti dell'utilizzo e della distribuzione del GPL [52].

Si noti che per quanto riguarda la classificazione secondo la legislazione in materia di rischi di incidenti rilevanti, direttiva 67/548/CE del Consiglio, del 27 giugno 1967, il GPL è F+, R 12-, ovvero **gas liquefatto estremamente infiammabile**¹.

Per quanto riguarda l'**attività di progettazione, installazione ed esercizio di impianti a GPL** le principali normative di riferimento sono:

- **Legge n. 7/1973**, modificata ed integrata dalla Legge n. 539/1985, che riguarda l'esercizio delle stazioni di riempimento e di distribuzione di gas di petrolio liquefatti in bombole. Impone il rispetto di un rapporto minimo tra capacità volumetrica dei serbatoi fissi e capacità complessiva di tutti i recipienti, di proprietà o per i quali siano stati stipulati contratti di riempimento con i terzi. La presente legge inoltre provvede a disciplinare l'attività di distribuzione e vendita di GPL nei casi in cui il titolare di tale attività non disponga di un proprio impianto di riempimento e di travaso. In particolare all'art. 2 dove si prevede che il soggetto, privo di impianti di riempimento e di travaso, che intenda esercitare con recipienti propri la distribuzione e la vendita di GPL debba richiedere specifica concessione al

¹per la classificazione completa secondo la Dir 67/548/CE si guardi l'appendice a pag. 216

Prefetto o al Ministero dell'Industria, a seconda che l'attività debba essere svolta in una sola o in più provincie.

- **Norme UNI CIG** ²: forniscono consigli per la realizzazione di un impianto. Innanzitutto per quanto riguarda le condotte la norma in parola regola in modo dettagliato la materia che prima era lasciata in gran parte al buon senso ed all'improvvisazione degli installatori. Classificando le condotte in varie specie, stabilisce i materiali che debbono essere utilizzati per realizzare le condotte e più precisamente tubi di: acciaio, rame, polietilene (queste ultime solo se interrate).

Per quelle in rame sono previsti differenti spessori se si tratta di condotte interrate o aeree. In riferimento alle varie specie sono previste particolari condizioni per l'attraversamento di androni o locali sotto il livello stradale e similari e non è consentito l'attraversamento con condotte di gas di parti di fabbricato destinate ad autorimesse, locali caldaie, depositi di combustibili o materiali infiammabili, vani per ascensore, canne fumarie, condotti di scarico acque e immondizie, condotti destinati all'alloggiamento di altri servizi. La norma prende in considerazione anche i criteri di posa delle condotte che dal serbatoio vanno all'esterno del fabbricato. La profondità di interrimento è vincolata alle specie della condotta e alla tipologia di terreno e non è più fissa come per il passato, ma varia in relazione alle condizioni.

- **D.M. del 21/5/1974** riguarda le specifiche relative agli apparecchi a pressione ed il loro esercizio, ed in particolare, prevede l'obbligo di apposizione, su una parte essenziale del recipiente, di una targa indicante gli estremi identificabili del costruttore (nome e ragione sociale, luogo ed anno di costruzione, temperatura e pressione di progetto, numero di fabbrica del recipiente).
- **D.M. del 21/12/1982** detta regole tecniche destinate al settore degli apparecchi ed impianti a pressione, valide per l'attività di omologazione attribuita all'Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (I.S.P.E.S.L.).

²Le norme da utilizzarsi sono norme obbligatorie di legge. Le norme tecniche di riferimento sono le norme UNI-CIG, quali ad esempio la norma UNI-CIG 7129 per la progettazione, costruzione, installazione e manutenzione di impianti a gas alimentati a gas naturale (metano) o GPL da reti canalizzate. La norma UNI-CIG 10738 che consente di verificare l'idoneità al funzionamento ed al mantenimento in esercizio degli impianti realizzati prima del 1990. Vi sono poi una serie di norme specifiche che trattano la parte accessoria o impiantistica degli impianti gas, quali la costruzione degli apparecchi a gas, la costruzione dei canali da fumo o camini ed altri accessori, queste vengono normalmente reperite nelle raccolte di norme UNI -CIG o UNI -EN (norme europee recepite dall'UNI).

- **D.M. del 31/3/1984**, ed il successivo D.M. del 29/2/1988, sanciscono norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di GPL con capacità complessiva non superiore a 5 m³ che sono destinati ad alimentare impianti centralizzati, per tutti gli usi con lo scopo di garantire la sicurezza nell'impiego del combustibile. In tali decreti vengono specificate le modalità d'installazione dello stesso sia nel caso di serbatoio fuori terra che di serbatoio interrato, i materiali impiegabili per la relativa realizzazione, le regole per il travaso del GPL ed i requisiti professionali per il personale addetto a tale operazione. Il D.M. del 29/2/1988 dispone che, sulla base di un'esplicita autorizzazione da parte dell'I.S.P.E.S.L., le verifiche di omologazione di primo e nuovo impianto possono aver luogo presso il magazzino della ditta installatrice del serbatoio o fornitrice del gas, a condizione che la stessa assicuri l'impiego di personale qualificato e la corretta installazione del recipiente completo dei relativi accessori, assumendosene le relative responsabilità. I decreti stabiliscono inoltre che le verifiche annuali di esercizio e le verifiche decennali per i predetti recipienti devono essere effettuate da personale qualificato delle suddette ditte, in presenza di funzionari I.S.P.E.S.L. o della competente U.S.L.. Si deve poi prendere in particolare considerazione l'art. 3 del D.M. del 29/2/1988 che consente l'esonero dalle verifiche annuali di esercizio su domanda sottoscritta congiuntamente dall'utente e dalla ditta fornitrice di gas, a condizione che questa si impegni a proteggere la valvola di sicurezza con altra previamente tarata al banco in presenza dell'I.S.P.E.S.L..
- **Legge n. 46/1990**, riguarda la regolamentazione sulla sicurezza degli impianti tecnici, tra cui quelli funzionanti a GPL e che detta una serie di procedure e controlli per la concezione progettuale dell'impianto, l'installazione dello stesso, il trasporto e la utilizzazione del gas liquido all'interno degli edifici, stabilendo che tali attività debbano essere eseguite da imprese specializzate munite di determinati requisiti tecnico-professionali, il cui possesso è accertato da apposite commissioni competenti. Inoltre, detta legge prevede specifici collaudi tecnici al fine di assicurare la conformità degli impianti alle disposizioni in vigore. L'art. 14 in particolare sancisce che le procedure di controllo e di verifica degli impianti possono essere espletate direttamente dai Comuni, dalle Unità Sanitarie Locali, dai Comandi dei Vigili del Fuoco, dall'I.S.P.E.S.L. o anche da liberi professionisti, incaricati dalle suddette Autorità ed iscritti in appositi elenchi conservati dalle Camere di Commercio.

Inoltre a partire dal 1993 l'Autorità è intervenuta nel settore dei gas di petrolio liq-

uefatti (GPL) per uso domestico quando il Consiglio di Presidenza del Centro Italiano GPL ha approvato in accordo con l'associazione di categoria dei produttori e distributori di gas di petrolio liquefatti, una delibera riguardante un contratto tipo che disciplinava le condizioni delle forniture per uso domestico offerte alla clientela, nonché le modalità di installazione e di manutenzione dei serbatoi di GPL. Anche se tale delibera è stata poi revocata l'Autorità, al termine di un'istruttoria conclusa nell'aprile 1993, ha ritenuto che l'uniformarsi delle maggiori imprese del settore allo schema contrattuale tipo fosse in contrasto con la legge n. 287/90, ai sensi dell'art. 2, comma 2, lettere a) e b).

- **DPR 18.04.1994**, n° 420 ha condotto ad una notevole semplificazione delle procedure per l'ottenimento della concessione per l'installazione di impianti di lavorazione o di deposito di oli minerali, prevedendo infatti, tempi certi entro cui completare l'iter burocratico per l'ottenimento della suddetta concessione, nonché la possibilità di ricorso all'istituto del silenzio -assenso. Inoltre, si è dato vita ad una sorta di sportello unico dal momento che è un'unica Amministrazione, prima il Ministero dell'Industria ed attualmente, dopo la riforma Bassanini, la Regione, che provvede ad inviare copia della domanda a tutte le altre amministrazioni di cui sia necessario acquisire il parere, e che emette il provvedimento finale.
- **DPR 420/94** prevede, inoltre, una ulteriore semplificazione delle procedure amministrative concernenti le cosiddette opere minori, dal momento che con il Decreto attuativo dell'11.01.95, sono state indicate le opere minori soggette ad autorizzazione ed anche quelle per le quali sussiste un semplice obbligo di comunicazione all'Amministrazione.

La normativa si occupa anche dell'**attività di stoccaggio e impiantistica**:

- la **Legge 367/34** e la **Legge 327/58** riguardano la concessione per l'installazione e la gestione di impianti di riempimento, travaso e/o deposito di GPL, che fino all'entrata in funzione del processo di decentramento amministrativo, previsto dalle leggi di riforma 'Bassanini', era rilasciata dal Ministero dell'Industria, se la capacità di stoccaggio era superiore a 50 m³, e dal Prefetto della Provincia, se la capacità di stoccaggio non era superiore a 50 m³.
- Importante è inoltre la direttiva europea **Seveso II (DPR 334/99)**. La cosiddetta direttiva Seveso II (Direttiva 96/82/CE) è la norma europea tesa alla prevenzione

ed al controllo dei rischi di accadimento di incidenti rilevanti, connessi con determinate sostanze classificate pericolose, tra le quali per l'appunto il GPL. La direttiva prevede specifici obblighi per i gestori di quegli stabilimenti in cui tali sostanze siano o possano essere presenti, in quantitativi superiori a specifici limiti di soglia stabiliti dalla Direttiva stessa. Ai fini dell'applicazione della direttiva Seveso le sostanze che risultano classificate come pericolose sono in via generale le sostanze:

- tossiche e molto tossiche;
- comburenti;
- esplosive;
- infiammabili, facilmente infiammabili ed estremamente infiammabili;
- pericolose per l'ambiente.

Pertanto il GPL è interessato da questa normativa in quanto, come si è già detto, sostanza estremamente infiammabile. Essa impone, tra le altre cose, agli Stati membri di identificare i propri siti a rischio. Nell'ambito di tale compito, ogni Stato membro ha l'obbligo di recepire tale direttiva concernente il controllo dei **rischi da incidente rilevante**, che coinvolgano appunto sostanze pericolose.

In Italia il decreto legislativo di riferimento è DL 334 del 1999 e il successivo testo con le modifiche (D.L. 238 del 2005). Tale decreto stabilisce tra i diversi compiti l'obbligo di:

- ◇ censire gli stabilimenti a rischio e identificare le sostanze pericolose;
- ◇ verificare l'esistenza in ogni stabilimento a rischio di un piano di prevenzione e di un piano di emergenza;
- ◇ informare gli abitanti delle zone limitrofe;
- ◇ realizzare delle **procedure di valutazione del rischio**. Tali procedure di valutazione del rischio implicano la determinazione delle aree di impatto che devono essere distinte in aree interne ed esterne allo stabilimento. Il ruolo della modellistica numerica legata agli incidenti rilevanti è fondamentale per la valutazione di queste aree di impatto ed è l'unico strumento oggettivo a disposizione delle aziende e degli organi vigilanti sul quale potersi basare per questa valutazione.

E' altresì rilevante mettere in evidenza come il Decreto di recepimento della Direttiva 'Seveso II' sia un punto fondamentale nell'attuale legislazione che regola l'attività di stoccaggio del GPL. Tale normativa, che per il GPL si applica solo agli impianti in cui il prodotto è presente in quantità superiori alle 50 tonnellate, prevede una verifica dell'attività industriale non essenzialmente di tipo impiantistico, ma anche di tipo gestionale, attribuendo a quest'ultimo aspetto un'importanza paritetica nella valutazione complessiva.

Infine regola gli aspetti connessi alle modifiche degli impianti che non comportano aggravio del preesistente livello di rischio.

Per quanto riguarda il **trasporto e condizioni di stoccaggio** del GPL, la normativa di riferimento è contenuta nel Regolamento approvato con **D.M. 12 settembre 1925** e nella serie di Norme Integrative e circolari ministeriali successivamente emanate.

- **D.M. 12 settembre 1925** dispone per lo stoccaggio ed il trasporto dei gas e afferma che sono soggetti all'osservanza delle prescrizioni i recipienti di capacità fino a 1000 litri che, trasportando per ferrovia o su strada gas compressi, liquefatti o disciolti in solventi in modo da impedirne la libera espansione nell'atmosfera, siano sottoposti a pressione interna superiore a 3 bar assoluti, a 50°C, salvo le speciali condizioni richieste per i trasporti internazionali che non siano ivi contemplati. In tale decreto vengono poi prese in considerazione le categorie di gas, alle quali la norma fa corrispondere specifiche **condizioni di riempimento** dei contenitori di stoccaggio.

Il GPL rientra nella categoria definita 'miscele di gas liquefatti', i cui nomi commerciali sono stati introdotti in Tabella 1.1 a pag. 4. Il decreto in questione disciplina le condizioni di riempimento che vengono espone nella sezione dedicata a pag. 84.

Inoltre stabilisce che i recipienti debbano essere esclusivamente di acciaio in unico pezzo; essi vengono distinti a seconda della loro capacità in:

- ✓ bombolette (< 3 l tolleranza in più 10%)
- ✓ piccole bombole (3 < capacità < 5 l tolleranza in più 10%)
- ✓ bombole³ (5 < capacità < 150 l)

³per le definizioni tecniche di **capacità geometrica, pressione di carica, pressione di prova, tara, pressione di esercizio, ogiva e punzonatura** si confronti l'appendice a pag.215

✓ bomboloni ($150 < \text{capacità} < 1000 \text{ l}$)

All'art. 16 vengono inoltre disciplinate le aperture dei recipienti, stabilendo che essi debbano essere muniti di una sola apertura praticata sull'ogiva, cfr. Figura 3.1. Tuttavia per il trasporto di GPL esistono delle disposizioni particolari: è ammesso che i recipienti di capacità uguale o maggiore a 100 litri siano muniti di un numero di aperture maggiore di quello prescritto, per l'applicazione di apparecchi per la misurazione del livello o della pressione.

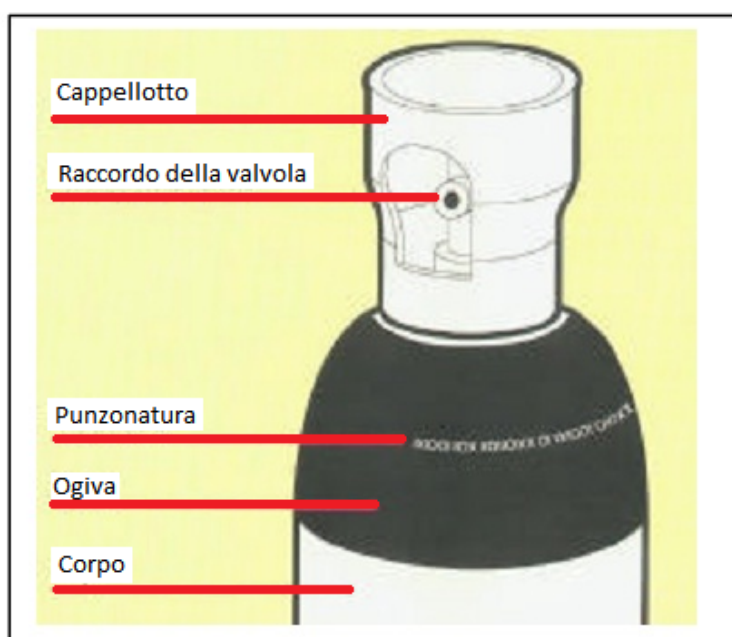


Figura 3.1: Individuazione delle bombole

Sempre all'art. 16 vengono esaminati valvole, cappellotti e guarnizioni e si stabilisce che tutti i recipienti a pressione di carica superiore a 20 bar debbano essere muniti di una valvola di riempimento protetta da cappellotto forato: valvola e cappellotto devono portare impressi i rispettivi pesi.

Per i gas liquefatti la **pressione di carica**⁴ deve essere assunta pari ai 2/3 della **pressione normale di prova**⁵.

Inoltre il cappellotto non è obbligatorio quando i rubinetti siano incassati nel recipiente e protetti da dado cieco, o quando i recipienti siano trasportati in casse.

⁴cfr. nota precedente

⁵cfr. nota precedente

Le valvole per riempimento e prelievo del gas devono essere del tipo 'a valvola' o 'a spillo'.

I materiali con i quali sono costruiti i rubinetti e gli accessori non devono essere attaccabili dai gas con i quali vengano a contatto né formare con essi combinazioni nocive o pericolose; inoltre gli organi di chiusura dei recipienti debbono essere a perfetta tenuta, in modo da evitare perdite di gas.

L'art. 17 invece riguarda i raccordi delle valvole in relazione ai gruppi di gas. Se ne individuano di diversi tipi per evitare l'involontario scambio fra bombole destinate a gas per i quali la sostituzione o la mescolanza possa risultare pericolosa.

In particolare per il GPL il raccordo da usare deve essere di tipo maschio con diametro della vite di 20 e senso della filettatura sinistrorso con 14 passi per pollice.

- **Regolamento ECE/ONU 67/01** stabilisce che i serbatoi GPL destinati all'installazione a bordo delle autovetture e tutti i componenti accessori, parti meccaniche sottoposte a pressione differente da quella ambiente, debbano essere progettati, costruiti e testati in base al regolamento ECE/ONU 67/01 introdotto dal 1° gennaio 2001 a livello Europeo. Tale regolamento introduce l'utilizzo della elettrovalvola o multivalvola che deve essere installata sul serbatoio GPL e che comanda l'apertura o la chiusura della connessione con il vaporizzatore, della valvola di sovrappressione e la valvola termofusibile che in caso di aumento di temperatura e/o incendio che causa l'aumento di pressione all'interno del serbatoio, permette la fuoriuscita controllata del GPL, impedendo il collasso del serbatoio e lo scoppio dello stesso causato dalla sovrappressione interna.

Per quanto attiene invece la normativa per il **trasporto** del GPL, in quanto considerato **merce pericolosa** ai sensi di legge, essa viene discussa nella sezione dedicata alla sicurezza dei trasporti, a pag. 87.

3.2 Stoccaggio del GPL

Come si è già visto nel Capitolo 1, il GPL può essere liquefatto applicando moderate pressioni a temperatura ambiente, oppure con una refrigerazione non troppo spinta a pressione atmosferica. Si possono quindi realizzare due tipi di installazioni di GPL:

1. installazioni che comprendono **serbatoi pressurizzati**, ovvero contenenti GPL stoccato sotto pressione a temperatura ambiente;
2. installazioni che comprendono **serbatoi criogenici o refrigerati**, ovvero contenenti GPL stoccato a pressione atmosferica e a temperatura inferiore agli 0°C.

Per quanto riguarda l'analisi connessa ai depositi di GPL, si fa riferimento, in questo studio, ad installazioni di GPL in serbatoi pressurizzati, in particolare ai depositi dove lo stoccaggio è realizzato in serbatoi interrati, o in serbatoi coibentati installati fuori terra. Si escludono quindi gli stoccaggi di GPL in serbatoi refrigerati.

I depositi di GPL sono costituiti essenzialmente da:

- uno o più serbatoi di capacità variabile e provvisti dei necessari organi di controllo e sicurezza;
- una stazione di travaso per lo scarico delle cisterne in arrivo e per il carico delle cisterne in partenza, costituita da una o più elettropompe e/o uno o più elettrocompressori;
- un ponte a bilico per il controllo della quantità del prodotto ricevuto o ceduto; a questo scopo nei depositi di minore importanza invece del costoso ponte a bilico si può ricorrere all'impiego di un contatore a liquido.

Qualora nei depositi si esegua anche il servizio di imbottigliamento, viene realizzata una stazione di imbottigliamento costituita da una o più elettropompe ed una o più bascule automatiche.

Il GPL che arriva al deposito con carri e autocisterne, come mostrato in fig.3.2, viene immagazzinato nei serbatoi fissi in attesa di essere rispedito, in autocisterne o bombole, ai vari centri di distribuzione o di consumo. La capacità di stoccaggio di un deposito è solitamente almeno uguale alla capacità massime delle cisterne di rifornimento.

Ogni serbatoio viene piazzato su due selle in cemento armato o in muratura di dimensioni tali da realizzare una buona stabilità dell'opera, tenuto conto del terreno di fondazione, alloché i serbatoi sono riempiti d'acqua. Se il terreno è soggetto ad inondazioni, i serbatoi devono inoltre essere solidamente ancorati ai loro supporti.

I serbatoi di uno stesso gruppo vengono disposti entro un bacino di contenimento. La capacità totale di un bacino contenimento è pari ad almeno 1/5 della capacità geometrica dei serbatoi che lo sovrastano. Esso è in pratica costituito da un argine o muretto di calcestruzzo e suddiviso in vari comparti quanti sono i serbatoi.

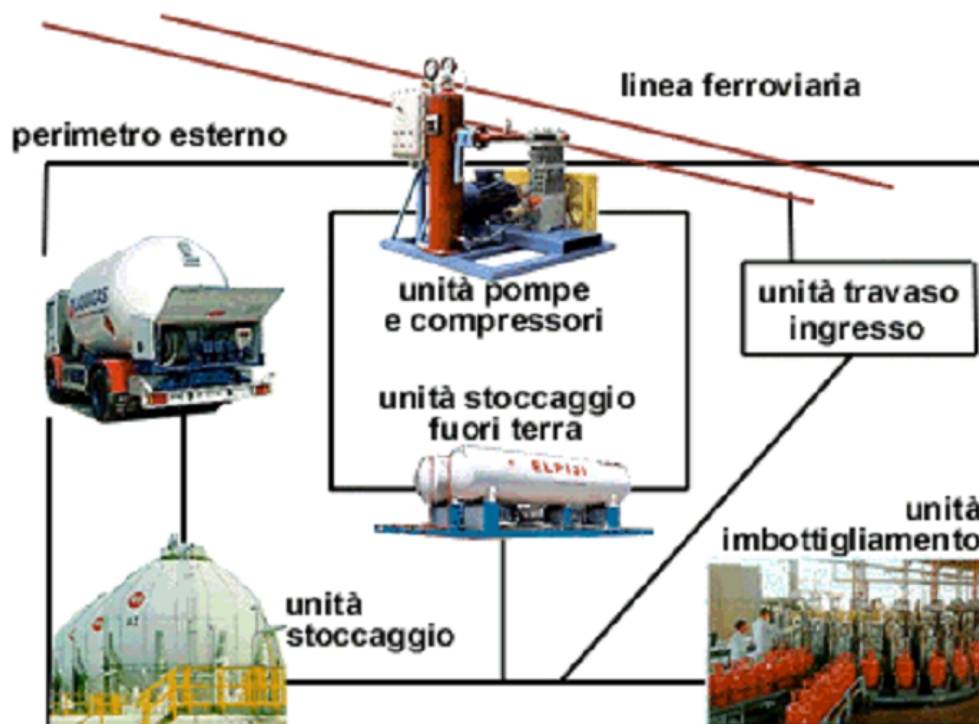


Figura 3.2: I treni con le ferro cisterne o le autocisterne alimentano in genere i grandi depositi dei principali distributori di GPL. Escludendo le caverne, i depositi criogenici o refrigerati, il decreto del Ministero dell'Ambiente 15 maggio 1996 stabilisce i criteri di analisi relativi alla sicurezza dei depositi di gas di petrolio liquefatto. Senza entrare nei dettagli, in questa sede interessa dare una descrizione sommaria degli elementi che compongono un grande deposito ed alcune caratteristiche generali di sicurezza degli impianti stessi, utilizzando il concetto di **unità logiche distinte**, proprio del decreto ed esemplificate in questa figura.

Tutte le valvole che disimpegnano il servizio relativo ad un gruppo di serbatoi, sono piazzate entro il perimetro del bacino di contenimento. Per quanto riguarda il servizio travaso, quale che sia la costituzione del gruppo di serbatoi, il deposito può disporre di un raccordo ferroviario o di una strada carrozzabile di accesso. Il raccordo ferroviario è tale per cui in nessun caso il locomotore di manovra debba penetrare nella zona di sicurezza, ad eccezione tuttavia di quella che contorna tubazioni flessibili di raccordo al carro cisterna. Se il raccordo è elettrificato, un dispositivo permette di interrompere la corrente nel settore nel quale il carro cisterna sosta durante l'operazione di travaso. Le apparecchiature per il travaso sono protette da una opportuna custodia non combustibile. I punti di travaso debbono inoltre essere ubicati in zone aperte e ventilate, essere disposti in modo da evitare interferenza di traffico tra autocisterne e permettere l'eventuale entrata di mezzi di emergenza provenienti dall'esterno. Il sistema viene quin-

di allocato fuori dal bacino di contenimento e deve essere accessibile da tre direttrici. Per ridurre al minimo le possibilità di dispersione di GPL nell'atmosfera, nella stazione

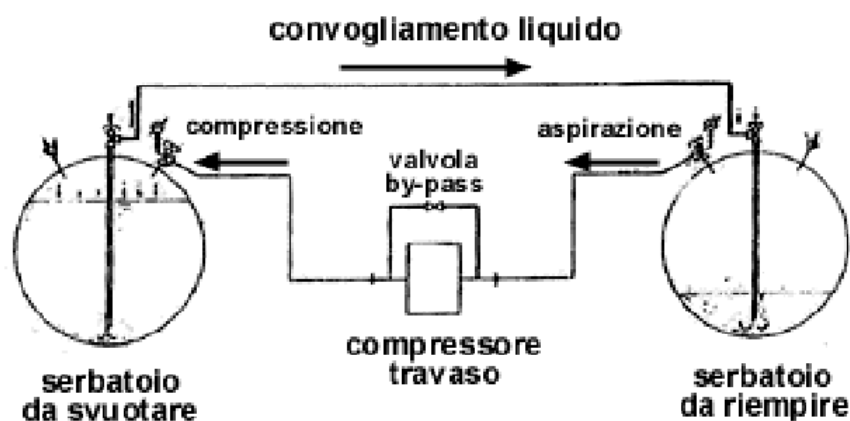


Figura 3.3: Travaso tra due serbatoi di grande capacità mediante compressore: vanno impiegati entrambi gli attacchi del recipiente, per la fase liquida e per quella gassosa, come è mostrato nello schema di cui sopra.

di carico delle autocisterne (serbatoi mobili), il travaso viene effettuato a mezzo di due tubazioni flessibili (*manichette*)⁶, l'una per la fase liquida e l'altra per la fase vapore, con l'ausilio di una pompa o di un compressore (cfr. fig.3.3). Questi flessibili sono collegati ad un dispositivo fisso comprendente:

- per il liquido una valvola per la limitazione del flusso; una valvola sezionatrice ed un raccordo per la tubazione flessibile dell'autocisterna;
- per il vapore: una valvola di sicurezza, un manometro, una valvola per la limitazione del flusso, una valvola sezionatrice ed un raccordo per la tubazione flessibile dell'autocisterna.

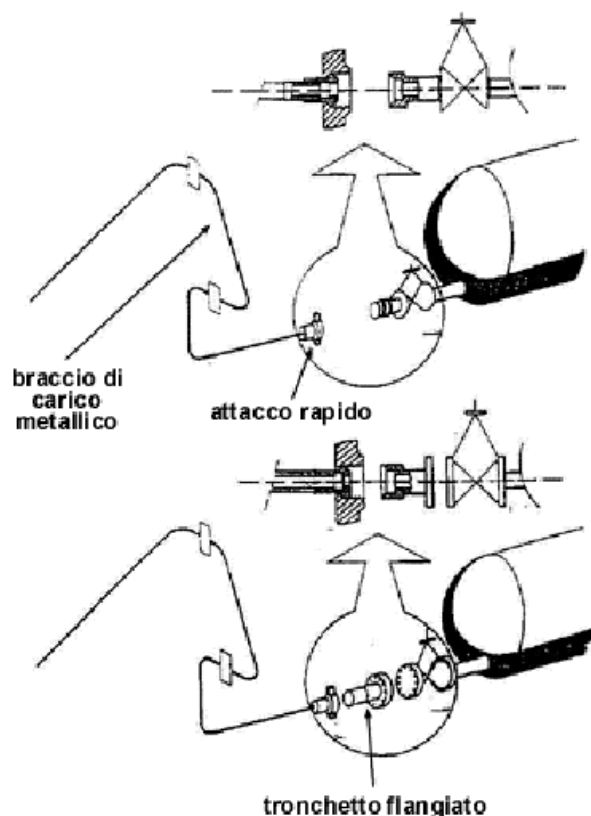
Il materiale fisso è sistemato sotto una tettoia incombustibile mentre il basamento è in calcestruzzo e facilmente accessibile almeno da tre lati.

Bisogna precisare che l'accoppiamento tra attrezzature fisse e quelle mobili (tutte messe a terra tramite una pinza secondo una dettagliata procedura⁷) non viene sempre realizzato tramite tubazioni flessibili (usate anche per il travaso dall'autocisterna ai piccoli

⁶La pressione di scoppio delle manichette, con raccordi montati, deve essere di almeno 80 bar.

⁷Il collegamento di terra per l'equipotenzialità elettrica fra l'impianto fisso e i mezzi mobili e le manovre di attacco e stacco dei bracci di carico o manichette flessibili devono avvenire secondo la seguente se-

serbatoi), ma a volte mediante appositi bracci metallici e un solo attacco rapido, oppure con l'ausilio di un tronchetto flangiato (si veda figura sottostante).



Anche in questo caso il terminale libero per la fase gassosa deve essere dotato di valvole di intercettazione. Le estremità dell'impianto fisso, cui sono collegati i bracci metallici, devono essere provviste di valvole comandate a distanza e valvole di intercettazione manuale a monte delle stesse⁸. Al termine di ogni ciclo di travaso, prima che sia scollegato il braccio, il tronchetto di collegamento tra ferro cisterna e valvola terminale del braccio di carico deve essere svuotato, in area sicura, dall'eventuale liquido residuo, tramite un particolare dispositivo.

Nello stesso deposito sono ammessi più punti di travaso disposti a pettine ad una distanza di 8 m nel caso in cui è prevista l'interposizione di muri di schermo; un adeguato impianto di raffreddamento costituisce l'ulteriore misura di sicurezza (fig. 3.4).

quenza: a) collegamento meccanico della pinza; b) chiusura del collegamento elettrico a terra; c) attacco dei bracci e travaso; d) stacco dei bracci; e) apertura del collegamento elettrico a terra; f) scollegamento meccanico della pinza. Decreto del Ministero dell'Interno 13 ottobre 1994, punto 13.5.5.

⁸Quando il movimento di GPL avviene nel solo senso da autobotte o ferro cisterna a serbatoi fissi è sufficiente una valvola di non ritorno e una valvola di intercettazione manuale.

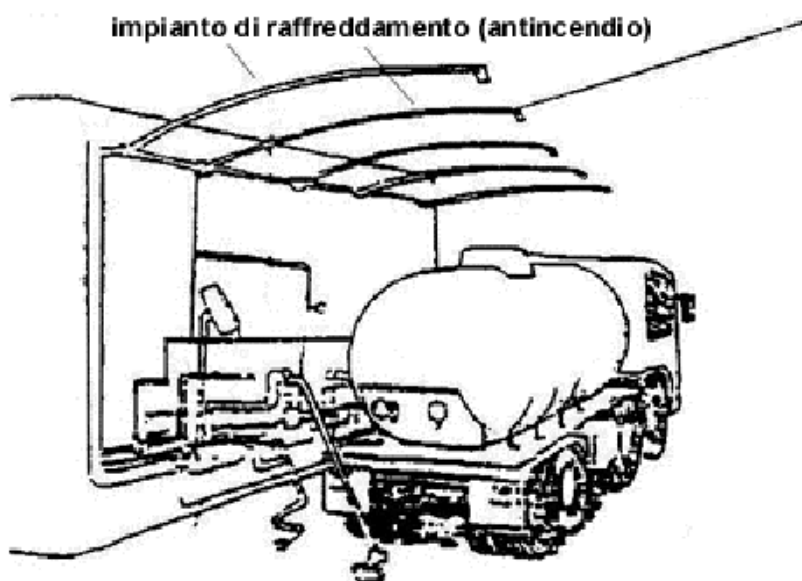
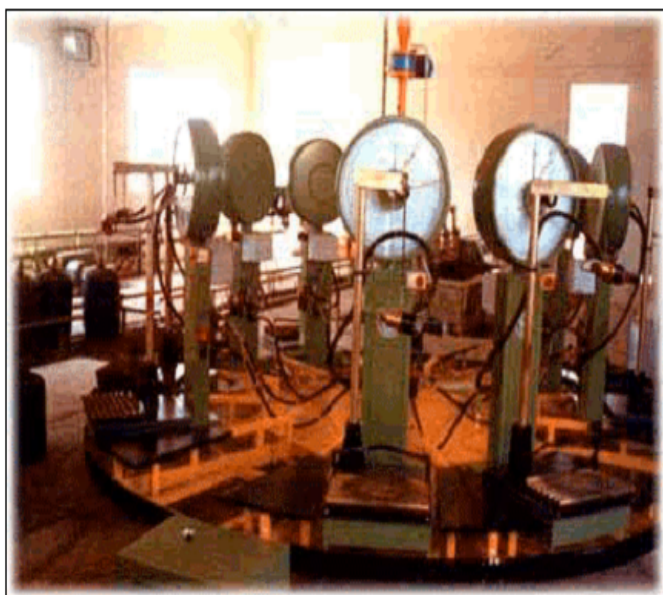


Figura 3.4: Dispositivi antincendio nei punti di travaso del deposito

Inoltre nei depositi gli **impianti di imbottigliamento** sono quelli nei quali il GPL viene immesso in un circuito automatico, detto giostra o carosello, capace di caricare le bombole. Il collegamento alle bombole viene effettuato da una tubazione (nera) flessibile. Nella figura 3.5(a) è rappresentata una giostra con bilance per il controllo del peso, elemento essenziale di sicurezza poiché il liquido in pressione all'interno dei contenitori non deve raggiungere l'80% del volume disponibile (cfr. pag. 84). Mentre in fig. 3.5(b) è riportata una singola bilancia con evidenziato l'attacco per il riempimento della bombola che termina con una pinza di carico di sicurezza.



(a)



(b)

Figura 3.5: Imbottigliamento

La pinza non consente l'afflusso di GPL quando non è collegata al recipiente da riempire; inoltre è dotata di un comando di apertura (ad esempio un pulsante) che funziona solo in caso di collegamento ed è sensibile ad eventuali disfunzioni del fluido operatore (ad esempio aria compressa).

Sulla linea di adduzione del GPL liquido alle apparecchiature di imbottigliamento è disposta una valvola comandata a distanza, così come sulla linea di ritorno ai serbatoi. A valle delle apparecchiature di imbottigliamento devono essere disponibili sistemi per la prova di tenuta delle valvole e dei rubinetti dei recipienti. Nel caso di controlli con macchine automatiche, la prova di tenuta accerta perdite maggiori o uguali a 5 grammi in un'ora. Ciò equivale a 10 centimetri cubi di liquido e a circa due litri e mezzo di volume equivalente di gas.

Inoltre va di nuovo controllato scrupolosamente il grado di riempimento dei recipienti stessi. Le bombole⁹, con capacità generalmente di 10, 15, 20, 25, 50 e 100 kg, vengono riempite con il prodotto liquido, immagazzinate temporaneamente e successivamente caricate su camion per la distribuzione.

Il servizio di riempimento-stoccaggio-spedizione delle bombole, comprende:

⁹Per quanto attiene alle bombole fino a 1000 l (bomboloni), esse sono soggette all'osservanza delle prescrizioni sancite nel D.M. 12 Settembre 1925 e nelle relative serie di norme integrative, i cui contenuti sono già stati trattati nel paragrafo precedente.

Un' osservazione generale: ***i recipienti più piccoli (bombole) hanno solo un punto di aggancio con l'esterno per il trasferimento-utilizzo del GPL, laddove i serbatoi hanno due entrate-uscite, una per la fase liquida e una per quella gassosa.***

- una rampa per il riempimento delle bombole con bascula;
- un locale per il deposito delle bombole;
- una rampa per il carico e scarico delle bombole dai mezzi di trasporto.

3.2.1 Operazioni di movimentazione

Tra le principali operazioni che si effettuano negli impianti di stoccaggio di GPL si descrive di seguito il travaso allo stato liquido.

Il travaso di gas di petrolio liquefatto allo stato liquido da un carro cisterna o da una autocisterna ad un serbatoio fisso si può compiere in diversi modi. Un metodo impiegato per travasi di notevole quantità, è quello di ottenere lo spostamento del liquido agendo sul gas sovrastante la fase liquida. Questo sistema si definisce a 'compressore' ed è l'unico che permette di estrarre in notevole misura anche il gas residuo nel serbatoio scarico. Il quantitativo di gas che rimarrebbe altrimenti nella cisterna è in genere rilevante, perciò la possibilità di estrarre una elevata percentuale significa ridurre i costi di trasporto.

L'operazione di travaso con compressore, in riferimento alla fig.3.3, si può suddividere in due fasi:

1. Collegare con tubazione i fondi dei serbatoi tra i quali deve avvenire lo spostamento del liquido; creare nella zona occupata dal gas all'interno del serbatoio da scaricare una pressione maggiore rispetto a quella esistente nella zona gassosa del serbatoio da caricare. Il liquido che si trova nel serbatoio a pressione più alta viene così sollecitato a fluire nel serbatoio a pressione più bassa, attraverso la tubazione di collegamento. La differenza di pressione nei serbatoi viene creata dal compressore il quale aspira il gas del serbatoio da riempire e lo comprime nella zona gassosa del serbatoio da scaricare.
2. Quando tutto il liquido è stato trasferito nel serbatoio, si chiude la tubazione del liquido e si inverte il senso del flusso del gas, aspirando cioè dal serbatoio in fase di scarico e comprimendo nel serbatoio in carico. Si può così ridurre la quantità residua del gas nel serbatoio scarico a quella corrispondente alla pressione atmosferica.

Questo sistema di travaso è sicuro, non dà luogo a perdite ed è inoltre rapido se ci si limita alla prima fase (travaso del liquido).

Un altro **metodo** è quello di agire direttamente sul liquido impiegando una **pompa centrifuga** e collegando le zone gassose dei serbatoi fra cui avviene il movimento con una tubazione per stabilire o mantenere in queste l'uguaglianza delle pressioni. In questo caso è necessario porre la pompa ad un livello inferiore a quello del serbatoio da scaricare in modo da mantenere un certo battente sull'aspirazione della pompa ed evitare il fenomeno della cavitazione (garantendo un certo NPSH).

Questa soluzione è indicata per travasi di piccola entità, ma può dar luogo ad inconvenienti, talvolta notevoli, se la disposizione e l'allacciamento della pompa non sono studiati con cura ed eseguiti correttamente. Questo accade a causa della possibile formazione di bolle di gas nella tubazione di aspirazione della pompa. Questo sistema può essere usato anche per caricamento del prodotto nelle bombole e nei distributori stradali di GPL.

Non potendo impiegare nel caso di caricamento di piccoli recipienti, quali le bombole, la tubazione di raccordo per vapore, essendo questi provvisti di una sola valvola che serve sia per il carico del liquido sia per lo scarico del gas, la pompa dovrà far fronte ad una compressione che, per un dato tipo di prodotto, è legata alla temperatura esistente nella bombola in carico.

3.2.2 I Serbatoi

I serbatoi destinati al contenimento di GPL sono suddivisi dalla normativa italiana in base alla loro capacità. Inoltre possono essere ulteriormente distinti in tre grandi categorie: serbatoi fissi, serbatoi semifissi e serbatoi mobili.

Ciascun tipo è caratterizzato da impieghi e destinazioni ben definiti e di conseguenza viene progettato e costruito in base a specifici criteri e norme di sicurezza.

1. I **serbatoi fissi** possono servire allo stoccaggio nelle raffinerie o negli impianti di deposito e di imbottigliamento, oppure all'alimentazione delle installazioni di rifornimento o consumo diretto; in genere sono in lamiera di acciaio saldata o chiodata, poggiano su due o più selle e sono sopraelevati in modo da fornire un adeguato battente alle pompe di travaso del GPL.

Essi hanno un volume che può variare da $0,5 \text{ m}^3$ ad un massimo di $500 - 1000 \text{ m}^3$.

Questi serbatoi sono inoltre muniti di dispositivi di carico e scarico, di controllo e di sicurezza, di tipo diverso a seconda dell'impiego. Per il consumo diretto sono in genere utilizzati i cosiddetti 'piccoli serbatoi', con capacità variabile fino a 5 m³.

Le norme per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio di depositi di GPL con capacità complessiva non superiore a 5 metri cubi sono contenute principalmente nel Decreto Ministeriale del 31 marzo 1984¹⁰; si noti che la legislazione relativa ai piccoli depositi¹¹ precede di oltre dieci anni quella specifica¹² dei grandi depositi (con capacità superiore ai 5 m³). Anche l'esercizio dei serbatoi fissi di GPL di piccole dimensioni è vincolato a numerosi controlli (da parte di ISPESL e USL): una omologazione di primo o nuovo impianto, una verifica d'esercizio annuale e una verifica decennale.

Gli elementi di sicurezza dei serbatoi partono dalla loro ubicazione e dal rispetto di precise distanze di sicurezza da elementi esterni al deposito che potrebbero essere particolarmente affollati (scuole, uffici, chiese,...) o essere a loro volta fonte di pericoli in caso di incidente (depositi infiammabili, elettrodotti, ferrovia,...). Le distanze dipendono dal tipo di serbatoio (interrato o fuori terra) e dalla sua capacità. Nella figura 3.9 sono rappresentate quelle relative ai depositi fuori terra con capacità fino a 3 metri cubi.

Alla categoria dei piccoli serbatoi appartiene il serbatoio utilizzato per il consumo domestico, che è costituito da un serbatoio in acciaio trattato con una particolare verniciatura epossidica a forte spessore (circa 800 µm), che lo protegge dalle correnti vaganti del terreno; inoltre è ulteriormente protetto da 2 anodi sacrificali che ne garantiscono la durata per almeno 20 anni. Un esempio di serbatoio per uso domestico è mostrato nella Figura 3.7.

I serbatoi per uso domestico possono essere interrati o esterni, di capacità variabile fra i 1.000 e i 5.000 litri, ma la loro collocazione deve rispettare alcune

¹⁰Supplemento ordinario n. 22 alla Gazzetta Ufficiale n. 122 del 4 maggio 1984. Modifiche ed integrazioni al Decreto in questione sono avvenute con i Decreti: 15 ottobre 1992, Gazzetta Ufficiale n. 262 del 6 novembre 1992; 20 luglio 1993, Gazzetta Ufficiale n. 204 del 31 agosto 1993 nonché con le lettere circolari nn. P 2168/4106 sott.40 del 27/09/94; P 2004/4106 sott.40 del 27/10/95; P 2005/4106 sott.40 del 27/10/95.

¹¹L'aggettivo grande o piccolo relativo al serbatoio è spesso diffuso nella pratica, ma non deriva dalla normativa.

¹²Supplemento ordinario alla Gazzetta ufficiale numero 265 del 12 novembre 1994. Decreto Ministeriale 13 ottobre 1994, cfr. pag. 78.

distanze a seconda del luogo di installazione, come mostrato dalle figure 3.8 e 3.9.

I serbatoi per uso domestico sono poi dotati di un indicatore di livello del liquido a segnalazione continua, che fornisce la percentuale volumetrica di riempimento del serbatoio sul cui quadrante è indicato, con segno rosso, il livello massimo consentito, e di un manometro per la rilevazione della pressione massima di esercizio consentita, in modo che possa entrare in funzione, una volta raggiunta questa pressione, la valvola di sicurezza.

Ogni deposito è corredato di istruzioni di sicurezza per l'utente, applicate sul coperchio del pozzetto o in prossimità del serbatoio. Presso il deposito devono essere disponibili almeno due estintori a polvere chimica da 6 kg cadauno, adatti per fuochi di classe 89 B-C, conformi alle norme vigenti.

2. I **serbatoi semifissi** sono quelli dei vagoni cisterna, delle autocisterne e delle navi cisterna. Le caratteristiche di fabbricazione di tali serbatoi differiscono da quelle dei serbatoi fissi perché nella loro costruzione è richiesto un maggior coefficiente di sicurezza per tener conto sia delle sollecitazioni a carattere statico, che di quelle a carattere dinamico, come quelle determinate da condizioni atmosferiche o da eventi straordinari, per le quali non vi sono possibilità di controllo.

I vagoni cisterna hanno capacità tra le 8-10 tonnellate e le 20-25 tonnellate a seconda del tipo di carro su cui vengono montati (generalmente per i vagoni cisterna si utilizzano i serbatoi da 10t, mentre per le autocisterne si utilizzano i serbatoi da 25t). L'uso dei vagoni cisterna per il trasporto GPL è in continua crescita in Italia così come in Europa, sia perché è in aumento il consumo di GPL, sia perché il trasporto su rotaia per grandi volumi permette un grande risparmio in termini di costi, oltre che ad offrire una maggiore sicurezza. Tale sicurezza è dovuta appunto al fatto che statisticamente gli incidenti ferroviari hanno una incidenza piuttosto bassa, specie se paragonati a quelli automobilistici (nonostante l'incidente di Viareggio il trasporto su rotaia di combustibili fossili e quindi anche di GPL continua ad essere più sicuro rispetto a quello su gomma). Basti pensare che per esempio in Germania il trasporto su rotaia è obbligatorio per tratte superiori ai 200km.

In virtù di queste considerazioni, l'uso dei vagoni cisterna si va sempre più diffondendo sia in Italia che all'estero. Tuttavia questo tipo di trasporto può essere soggetto ad attentati di tipo terroristico; in particolare, dopo quanto accaduto l'11

settembre 2001, i legislatori internazionali hanno ritenuto necessario sviluppare e attuare ulteriori misure di sicurezza per il trasporto di merci pericolose. Sulla base di adeguate raccomandazioni ONU, nell'ADR sono state ora introdotte misure di 'sicurezza antiterrorismo' indirizzate a tutte le parti coinvolte nella catena di trasporto, in aggiunta alle consuete misure di sicurezza tecnica e antinfortunistica. Queste misure hanno avuto effetto dal 1° gennaio 2005 e sono state implementate alla fine dell'usuale semestre di transizione, al 1° luglio 2005.

3. Per quanto riguarda i **serbatoi mobili** si citano quelli delle autovetture, diffusamente trattati nella sezione dedicata al trasporto delle merci pericolose a pag.93. Questi possono essere di forma tradizionale cioè cilindrica, dotata di fondelli convessi, ma una soluzione indubbiamente più innovativa è costituita dai serbatoi di forma toroidale, appositamente concepiti per essere collocati nel vano della ruota di scorta. Anch'essi sono disponibili in diverse misure e la loro capacità, seppure mediamente inferiore a quella dei serbatoi cilindrici, offre comunque una più che sufficiente autonomia [52]. Per quanto riguarda i criteri costruttivi, questi serbatoi sono normati secondo la ECE/ONU 67/01 di cui sopra a pag. 65.

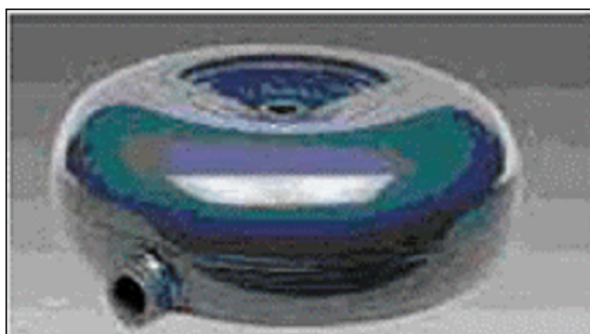


Figura 3.6: Serbatoio toroidale per autotrazione

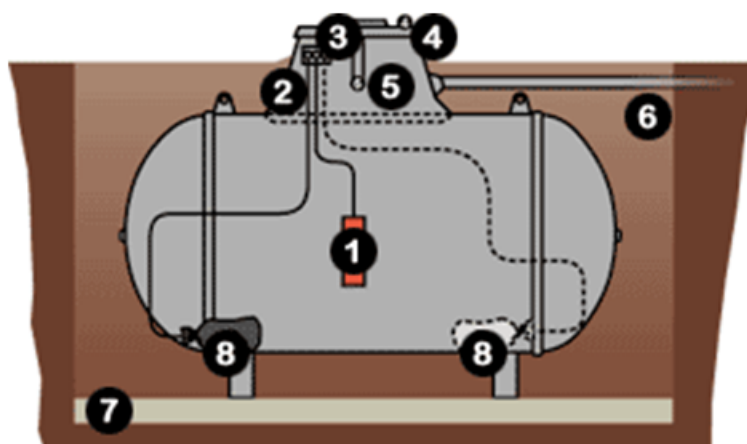


Figura 3.7: Serbatoio interrato per uso domestico: 1)Elettrodo di riferimento 2)Guarnizione di tenuta 3)Scatola di controllo 4) Sfiato meccanico 150 mmH₂O 5)Piastrino presa terra 6) Sabbia di cava o terra sciolta 7) Piano di appoggio livellato 8) Anodo di protezione

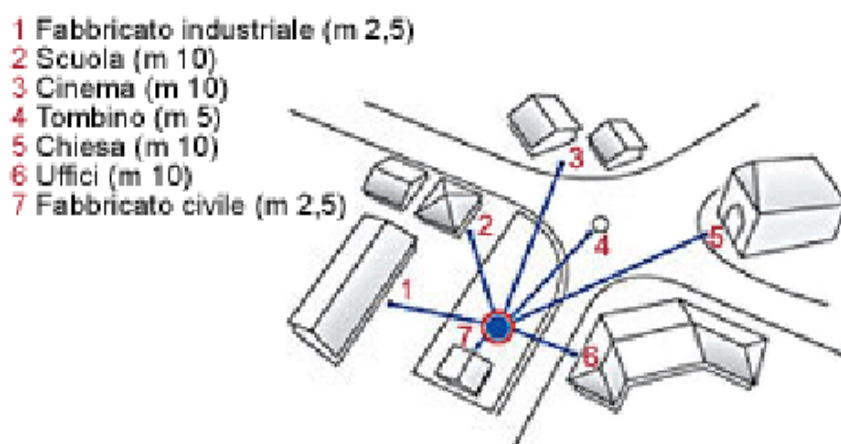


Figura 3.8: Schema indicativo delle distanze di sicurezza per una corretta installazione dei serbatoi interrati

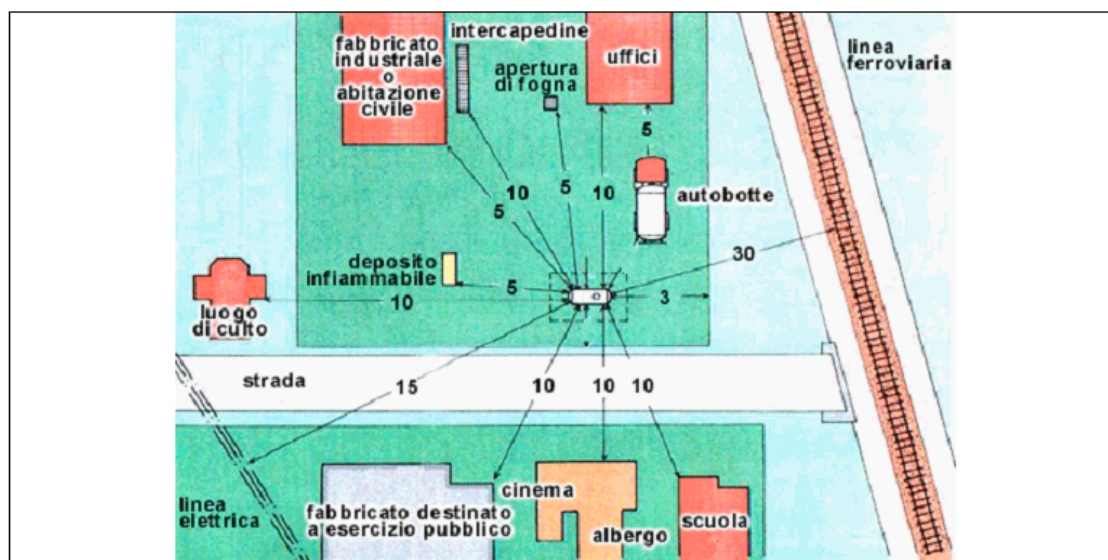


Figura 3.9: Schema indicativo delle distanze di sicurezza per una corretta installazione di depositi fuori terra fino a 3m³

3.2.3 Norme e criteri di progettazione

L'esame delle normative di sicurezza riguardo lo stoccaggio dei GPL in serbatoi di grande capacità, sia presso gli impianti primari (raffinerie e petrolchimici), che presso quelli adibiti alla distribuzione, ha evidenziato per molti anni la preoccupante assenza in Italia di una adeguata legislazione in merito.

Nel decennio scorso sono stati stilati tre importanti decreti ministeriali, che hanno così potuto sopperire alle precedenti carenze in fatto di normative di progettazione. Questi decreti ministeriali sono:

1. DM n. 76 del 14/4/1994
2. DM n. 142 del 13/10/1994
3. Dm n. 118 del 15/5/1996

Il DM n. 76 del 14/4/1994 recita: 'Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas di petrolio liquefatto ai sensi dell'art. 12 del decreto del Presidente della Repubblica 17 maggio 1988 n.175'.

Questo DM definisce accuratamente le modalità di analisi e di valutazione del contenuto dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di GPL. La procedura di valutazione del rapporto di sicurezza (RdS), prevede lo svolgimento delle seguenti fasi:

1. Analisi di completezza e di adeguatezza finale;
2. Valutazione del grado di sicurezza del deposito di G.P.L. attraverso l'applicazione di un metodo indicizzato;
3. Analisi degli eventi incidentali associabili alla tipologia ed al contenuto tecnologico del deposito di GPL.

La metodologia proposta si prefigge sia la valutazione dell'analisi incidentale presentata nel RdS, attraverso l'utilizzo di schede di valutazione, grafici, tabelle e formule di calcolo, sia la individuazione e l'analisi di eventi incidentali presi a riferimento per la loro rilevanza in relazione alle conseguenze.

Il successivo decreto ministeriale del 13/10/1994, nel Supplemento ordinario alla Gazzetta ufficiale numero 265 del 12 novembre 1994, recita: 'Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di GPL in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 metri cubi e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore ai 5000 kg'.

Non rientrano nel campo di applicazione del decreto i depositi refrigerati e criogenici ed i depositi in caverna.

Come già si è detto al paragrafo precedente sui serbatoi, vengono normati in particolare l'ubicazione, la disposizione dell'impianto, le distanze di sicurezza (interne ed esterne) e le attrezzature (tubazioni per liquido, valvole ed accessori, pompe, compressori ecc...). Inoltre sono considerati gli impianti elettrici di protezione catodica ed anodica, e di protezione antincendio, gli impianti idrici e di controllo. In particolare poi vengono analizzati i serbatoi fissi, con particolare riferimento ai serbatoi fuori terra e ai loro accessori.

Infine il DM n. 113 del 15/5/1996 recita: 'Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas di petrolio liquefatto (GPL)'. Questo DM è una rivisitazione del DM n.76 del 14/4/1994 precedentemente citato.

Anch'esso, infatti, si basa sull'analisi di completezza e adeguatezza delle informazioni contenute nel rapporto di sicurezza grazie all'utilizzazione di un metodo indicizzato per la categorizzazione delle unità e dei depositi di GPL. In particolare il metodo indicizzato sopra citato viene suddiviso in una prima fase di valutazione dei parametri intrinseci (ad esempio la determinazione del fattore sostanza, dei rischi generali di processo, ecc...) ed una seconda fase di individuazione dei fattori di compensazione (contenimento, controllo del processo, atteggiamento nei riguardi della sicurezza, protezione antincendio, ecc...).

Insieme a questo DM, nella valutazione dei criteri di Progettazione, bisogna anche tenere in considerazione le seguenti normative internazionali vigenti che però esulano dallo studio svolto:

- ✓ ICI / ROSPA;
- ✓ HSE Guidance Booklet;
- ✓ LPGITA Code of Pratiche;
- ✓ Institute of Petroleum Code of Safe Pratiche;
- ✓ API Publication 2510 A;
- ✓ CFR 1910 110;
- ✓ NFPA 58;

3.2.4 Criteri di sicurezza negli impianti di stoccaggio di GPL

Attorno ai serbatoi di GPL, in quanto prodotto altamente infiammabile, si adottano le più restrittive misure di prevenzione per evitare l'insorgere di fughe di gas e di incendi.

Secondo il DM 13/10/1994 articolo 11/14, è obbligatorio tarare l'allarme del sistema di rilevazione della presenza di gas al 25% del limite inferiore di esplosività e di interrompere l'alimentazione di GPL agli impianti presenti nel deposito, quando si raggiunge il 50% di questo limite. Tuttavia in considerazione del fatto che gli incendi possono ugualmente avvenire, devono essere previsti idonei sistemi di difesa antincendio. Gli impianti e le attrezzature antincendio del parco serbatoi si prefiggono i seguenti obiettivi:

- controllare ed eventualmente estinguere rapidamente principi di incendio;
- prevenire esplosioni o rapide propagazioni di incendi che possono provocare infortuni al personale;
- raffreddare i serbatoi o i recipienti in caso di incendio;
- prevenire la propagazione del fuoco a impianti o serbatoi circostanti;
- ridurre i danni alle apparecchiature e agli impianti coinvolti in principi di incendio;
- accelerare la diluizione nell'aria di eventuali perdite di GPL;

- favorire l'avvicinamento degli operatori di soccorso agli organi di manovra, comando e controllo dell'impianto.

E' buona regola che, incendi sviluppatasi da gas non devono essere spenti incondizionatamente se prima non si provvede alla interruzione del flusso del combustibile nella zona della perdita.

Se un incendio viene estinto prima di avere interrotto l'alimentazione della perdita di gas, questo continua a diffondere nell'ambiente, producendo una nuvola vagante formata da una miscela di aria e vapori altamente infiammabili che, se riaccesa (è sufficiente una scintilla), esplode con conseguenze disastrose.

Qualora risulti difficile interrompere prontamente la perdita, la principale necessità è quella di proteggere i serbatoi, le apparecchiature e le tubazioni irraggiate termicamente dalle fiamme.

La protezione, mediante raffreddamento con acqua, si realizza sia per il serbatoio coinvolto direttamente che per quelli circostanti. In questo modo si previene la rottura dei serbatoi a causa del surriscaldamento del mantello e la conseguente riduzione della resistenza meccanica. Tale protezione interessa in modo particolare la zona del serbatoio corrispondente allo spazio occupato dal vapore. Nella zona del serbatoio sotto il livello liquido, infatti, l'apporto di calore fa sì che il gas liquefatto evapori, mantenendo la parete relativamente fredda.

La parete della zona del serbatoio al di sopra del livello liquido non è invece raffreddata internamente dall'evaporazione, quindi si surriscalda e può arrivare a collassare prima della apertura della PRV(Pressure Relief Valve). L'adozione del rivestimento termico protettivo con caratteristiche isolanti, dei serbatoi e dei loro supporti per ridurre l'ingresso del calore, insieme all'azione di raffreddamento dell'acqua e alla depressurizzazione mediante valvole azionate a distanza, può ridurre il rischio di un tale incidente.

E' necessario quindi realizzare una rete idrica antincendio costituita da un sistema di tubazioni, in genere destinate a fornire acqua in ogni parte di un parco serbatoi per alimentare le varie utenze antincendio come gli idranti e gli impianti fissi. La progettazione della zona idrica deve garantire le seguenti caratteristiche:

- essere indipendente da ogni altra rete idrica;
- essere dotata di un adeguato numero di valvole di intercettazione(con indicazione visiva della condizione di apertura e chiusura) che ne permettano il sezionamento in tronchi in occasione di interventi di manutenzione, modifica o ampliamento.

to e principalmente durante interventi di riparazione, senza compromettere la continuità del servizio dell'intera rete;

- esistenza continua della pressione di rete, ottenibile o mediante un battente da serbatoio sopraelevato (il cui fondo dovrebbe superare di almeno 6m l'altezza del più alto spruzzatore installato) o mediante pompa di piccola portata sempre in moto;
- dotazione di una sufficiente riserva d'acqua;
- presenza di almeni due pompe di mandata con adeguate caratteristiche di prevalenza e di portata ed azionate da motori con diversa alimentazione(uno elettrico ed uno a combustione interna);
- struttura di anello chiuso(singolo o multiplo) con assenza, per quanto possibile, di lunghi tratti a terminale cieco allo scopo di assicurare l'alimentazione agli idranti da due diverse provenienze, evitando così anche eccessive perdite di carico;
- funzionalità propria e degli idranti anche in caso di temperatura inferiore a 0° C.

Le tubazioni a valle delle valvole di comando restano vuote per il periodo di inattività in modo da prevedere adeguati drenaggi nei punti più bassi.

La portata complessiva, da prendere come base per il dimensionamento del sistema idrico generale, si determina in relazione alla quantità di acqua richiesta per il massimo incidente di riferimento che comporti più sistemi di raffreddamento contemporaneamente in funzione.

Gli idranti rappresentano il più diffuso sistema di protezione contro gli incendi. Sono costituiti da apposite prese per il prelevamento dell'acqua in pressione dalla rete idrica: ad essi vengono collegate le manichette flessibili necessarie per portare l'acqua dagli idranti al luogo in cui si è sviluppato l'incendio. Qui viene poi erogata attraverso le lance idriche, che permettono di dirigere il getto(commutabile da pieno a nebulizzato) sulle zone interessate al fuoco e dove le perdite possono formarsi o accumularsi. Gli idranti vengono disposti ad intervalli regolari non superiori a 60 m, devono essere facilmente accessibili e disposti in modo da coprire l'intera area degli elementi pericolosi dell'impianto.

Gli **impianti fissi a diluvio** sono dei sistemi a pioggia nei quali gli estintori, ossia gli ugelli erogatori, sono costantemente aperti, per cui l'acqua viene scaricata contemporaneamente sulla totalità di una zona prefissata, agendo su un'unica valvola. Gli impianti

a diluvio si utilizzano a protezione dei serbatoi in cui si temono incendi a rapido sviluppo o di rapida propagazione.

Gli impianti idrici fissi di raffreddamento sono quelli basati sull'effetto di protezione provocato dall'acqua ridotta in forma di minute goccioline o nebulizzata. Questo effetto si ottiene erogando l'acqua sotto forte pressione attraverso appositi ugelli nebulizzatori. I sistemi idrici fissi hanno lo scopo di prevenire che un incendio più o meno vicino si propaghi all'apparecchiatura o all'impianto da proteggere; modo particolare, la propagazione del calore emesso da un incendio.

Questi impianti sono azionati manualmente a differenza degli impianti di estinzione, sono costituiti dai tubi di distribuzione dell'acqua posti attorno alle superfici da proteggere, su cui sono installati ugelli spruzzatori di tipo aperto a getto conico. Gli ugelli sono posti a distanza regolare fra loro e direzionati in modo da irrorare l'intera superficie del serbatoio.

Di seguito vengono descritti in dettaglio i sistemi di protezione antincendio dei serbatoi. Ogni serbatoio è protetto da tre sistemi antincendio primari:

1. **Diluvio d'acqua (WATERDELUGE):** l'acqua scende lungo i lati del serbatoio distribuita attraverso ugelli(con un diametro minimo di 37,5 mm) posti su tubazioni di almeno 75mm di diametro. La distanza verticale tra i bocchelli non deve superare i 3,7 m ed il sistema è azionabile manualmente da una postazione sicura distante almeno 15 m dal serbatoio;
2. **Cannoncini fissi (FIXED MONITORS):** automatici o manuali sono connessi alla rete idrica principale e posti a distanza di sicurezza; i getti (lineari o diffusi) raggiungono l'intera superficie del serbatoio(è possibile, per esempio, una gittata compresa fra i 15 e i 37,5 m se la pressione di alimentazione è di 6,8 atm).
3. **Nebulizzatori(WATER SPRAY):** consentono una nebulizzazione dell'acqua attraverso spruzzatori(con un diametro minimo di 65mm) disposti lungo tutto il serbatoio, automatici o manuali, hanno le linee principali di distribuzione di almeno 75mm di diametro, mentre quelle verso gli spruzzatori di almeno 20mm.

3.2.5 Criterio di riempimento dei contenitori del GPL

Tabella 3.1: Coefficienti di riempimento massimi per legge

Tipo di GPL	Grado di riempimento [kg/l]
N-butano puro	0,51
Isobutano puro	0,49
Propano puro	0,42
Miscela A	0,50
Miscela A0	0,47
Miscela A1	0,46
Miscela B	0,43
Miscela C	0,42

Il coefficiente di riempimento, o grado di riempimento, esprime la massa (in kg) di GPL per unità di capacità della bombola o del serbatoio (in l).

Come si è detto in precedenza, per quanto riguarda lo stoccaggio di GPL, la normativa di riferimento è contenuta nel Regolamento approvato con D.M. 12 settembre 1925. In particolare la 52^a serie di norme integrative ha stabilito i **coefficienti di riempimento massimi**, riportati in Tabella 3.1, nella quale si può osservare che, al crescere della percentuale di propano in miscela, il riempimento massimo consentito diminuisce.

Per esempio, poichè il coefficiente di riempimento massimo del butano commerciale, miscela A, è a 0,50 kg/l, si possono introdurre 25 kg di GPL solo in una bombola che abbia un volume superiore a 50 l, infatti si ha che:

$$25 \text{ kg} \div 0,50 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 50 \text{ l}$$

Se si introducessero 30 kg di butano commerciale nella stessa bombola di capacità 50 l si avrebbe un grado di riempimento pari a $30 \div 50 = 0,60$ kg/l maggiore di 0,50 kg/l e quindi in contrasto con la norma.

L'importanza di una regolamentazione in tal senso deriva quindi dal fatto che, in ragione di quanto analizzato nel Capitolo 1 a pag. 11 relativamente al legame temperatura - pressione, si possono avere delle condizioni di pericolo per l'integrità della bombola

se una bombola contiene una quantità eccessiva di GPL liquido e se la temperatura aumenta oltre un certo limite.

Infatti, come è noto, all'aumentare della temperatura, diminuisce nella bombola la quantità di vapore ed aumenta quella di liquido. Ad una certa temperatura nella bombola si avrà solo liquido. In queste condizioni, quando tutto il contenuto è liquido, la pressione aumenta molto anche per modeste variazioni di temperatura e si può giungere al collasso della bombola per eccessiva pressione interna.

D'altro canto, se la bombola è riempita correttamente, indipendentemente dal tipo di miscela, non si hanno problemi di sicurezza sia alle temperature ordinarie, sia a temperature superiori. Ad esempio per temperature di 80 °C la pressione varia da un minimo di circa 11 bar per la miscela A ad un massimo di circa 65 bar per la miscela C, pressioni certamente sostenibili dalle bombole in commercio.

Tuttavia, all'aumentare del grado di riempimento, si giunge alle condizioni critiche di sicurezza a temperature sempre più basse. Se poi il grado di riempimento è superiore al valore massimo consentito, a temperature ordinarie si hanno pressioni accettabili, ma in condizioni straordinarie ($T \geq 80^{\circ}\text{C}$) si possono avere problemi di sicurezza nel senso che non si arriva ancora alla pressione di rottura della bombola, ma si può arrivare a deformazioni plastiche anche vistose.

Con grado di riempimento pari a 0,5 kg/l la bombola collassa a 50°C per miscela B e a 40°C per miscela C.

Se la bombola è riempita completamente di liquido (100% liquido, 0% vapore) bastano modesti riscaldamenti per provocare aumenti di pressione interna capace di portare al collasso; tuttavia, se la bombola è riempita di liquido più del consentito, ma non al 100%, sono necessari riscaldamenti tanto più elevati quanto meno liquido vi è nella bombola. E' quindi evidente che il coefficiente di riempimento è un parametro molto importante per le bombole ed i serbatoio contenenti GPL.

Si noti che la ragione della notevole espansione del GPL liquido al crescere della temperatura risiede nel suo coefficiente di dilatazione cubico, che è alquanto elevato (dell'ordine di $0,002 \div 0,0025^{\circ}\text{C}^{-1}$), ossia circa 10 volte quello dell'acqua. Dal momento che, come tutti i liquidi, è ben poco comprimibile, se soggetto a una dilatazione termica, (che non è libera poichè il liquido è costretto all'interno di un ambiente chiuso), sviluppa un indesiderato incremento di pressione nel recipiente.

In tal caso, quindi, la pressione non dipende tanto dal GPL liquido, quanto dalla resistenza del serbatoio. Per evitare questa situazione, la legge prevede che il serbatoio non debba mai essere rifornito di GPL in fase liquida per oltre l'80% del volume. A ciò provvede una speciale valvola, attraverso un galleggiante ed un opportuno sistema di

blocco. E' da segnalare il fatto che altri sistemi innovativi sono allo studio e garantiranno ulteriormente la sicurezza contro il riempimento eccessivo.

Il riempimento limitato all'80% costituisce un ottimo margine di sicurezza. E' infatti necessario un surriscaldamento del GPL contenuto nel serbatoio di oltre 80 °C al di sopra della temperatura ambiente, perchè la sua dilatazione lo porti ad occupare l'intero volume. Un'escursione termica così elevata si può avere solo al persistere di un incendio, ma mai nelle condizioni normali d'uso.

Bisogna infine considerare che il raggiungimento del riempimento totale segna l'inizio della condizione di pericolo, ma non significa che il serbatoio sia in procinto di scoppiare, poichè dispone ancora di tutta la capacità che la lamiera ha di deformarsi plasticamente prima di giungere a rottura.

3.2.6 Collaudo e revisione contenitori: pressione di prova

La pressione di prova è la pressione idraulica prescritta dalla norma nei collaudi di prima costruzione e nelle revisioni periodiche dei recipienti. Per le miscele compresse è normalmente la pressione di carica, cfr. pag. 215.

La 55^a serie di norme integrative al Regolamento approvato con D.M. 12 Settembre 1925 (18 Ottobre 1963) sancisce l'obbligo di revisione decennale dei bidoni per GPL. Alla revisione decennale la bombola deve essere sottoposta alla pressione di prova per due minuti. Le pressioni di prova sono elencate in Tabella 3.2.

Tabella 3.2: Pressioni idrauliche di prova

Sostanza	Pressione di prova [bar]
N-butano puro	10
Isobutano puro	10
Propano puro	26
Miscela A	10
Miscela A0	15
Miscela A1	20
Miscela B	25
Miscela C	30

Si nota che, al crescere della percentuale di propano in miscela, aumenta la pressione di prova.

3.3 Trasporto del GPL

Si distinguono sei possibili sistemi di trasporto:

1. **bombole:** le bombole sono i recipienti più diffusi per l'alimentazione delle apparecchiature utilizzatrici. Esse sono di modesta capacità, inoltre, è ammesso il loro trasporto su carri ferroviari.
2. **Carri cisterna:** per grandi distanze risulta più economico il trasporto con appositi carri cisterna resistenti a 30 atm di pressione, della capacità da 20 a 60 m³.
3. **Autotreni cisterna:** per medie distanze il trasporto va in genere effettuato con autotreni cisterna che hanno fra motrice e rimorchio, una capacità utile di trasporto di circa 100 m³ di GPL.
4. **Autobotti:** è considerato utile l'impiego di questi automezzi dotati di apparecchi che permettono il carico e lo scarico del prodotto, per il rifornimento di piccole stazioni di imbottigliamento quando queste sono dislocate ad una modesta distanza dai depositi di rifornimento. La capacità di un'autobotte varia tra i 25 ed i 40 m³.
5. **Trasporto marittimo:** è ammesso il trasporto per nave di gas liquefatti qualora esso sia stoccato in serbatoi appropriati. Esistono anche apposite navi cisterna. Le cisterne sono multiple a forma cilindrica, disposte verticalmente con fondo superiore fuori coperta.
6. **Gasdotti:** per il trasporto di ingenti quantità di prodotto. Essi sono in genere adottati per il convogliamento di GPL dal luogo di produzione a grandi depositi di stoccaggio dai quali il successivo trasporto, ai vari centri minori, viene compiuto con serbatoi.

In base ai dati forniti dall'Assochimica [54] in merito al **trasporto di sostanze pericolose**, il GPL, quando viene distribuito tra le varie regioni, viaggia su strada per il 54%. Il trasporto ferroviario interno di GPL è invece appena attestato ad alcuni punti

percentuali (~ 4%), con un trend in aumento negli ultimi anni; il trasporto marittimo occupa una quota importante (oltre il 32%) in funzione delle importazioni dal bacino del Mediterraneo; infine i gasdotti raggiungono una quota significativa (circa 10%) in quanto funzionali ad alcuni porti e raffinerie.

Per quanto riguarda invece il trasporto dai depositi commerciali alle utenze non vi sono alternative al trasporto su gomma.

Le autocisterne vengono utilizzate per i trasporti dalle raffinerie ai piccoli impianti.

Le navi cisterna, d'altra parte, sono di impiego relativamente recente e sono in numero ancora limitato.

I serbatoi mobili sono dunque contenitori destinati al trasporto del GPL verso il consumo, ed in genere rappresentano anche i recipienti dai quali viene prelevato il gas per l'impiego. Possono essere di tipo, forma e volumi diversi. Le più diffuse sono le bottiglie e bombole che hanno capacità variabile da meno di 1 kg a 30-40 kg.

Un tema importante attualmente in discussione riguarda la gestione delle emergenze che si possono generare proprio nella fase di trasporto del GPL.

Il tema della sicurezza del trasporto di merci pericolose, come quelle gassose, attraverso vettori diversi: stradali, ferroviari e navali, è da sempre all'attenzione della comunità internazionale; organismi pubblici e associazioni di compagnie private hanno provveduto a dotarsi di regole gestionali e tecniche, sia attraverso l'emanazione di norme, sia attraverso l'adozione ed il rispetto di accordi, con l'obiettivo di garantire alla collettività un elevato grado di sicurezza a prevenzione e protezione da eventi incidentali possibili. Sono stati utilizzati a questo scopo strumenti che hanno portato a definire sia un'uniformità di comportamenti e di regole costruttive, sia le competenze e i compiti degli addetti dei comparti coinvolti.

Le merci denominate 'pericolose' non presentano tutte la stessa pericolosità; in particolare la pericolosità in ordine decrescente è la seguente:

- cloro
- ammoniaca anidra
- GPL
- ossido di etilene
- benzene
- etc...

Cloro e ammoniaca sono prodotti ad elevata tossicità e pertanto maggiormente pericolosi rispetto a quelli la cui pericolosità sia da ascrivere principalmente all'infiammabilità come GPL, ossido di etilene e benzene.

Come figura nel Decreto Legislativo più recente (27 gennaio 2010) n. 35 di attuazione della direttiva 2008/68/CE, relativa al trasporto interno di merci pericolose, le regole tecniche di sicurezza concernenti il trasporto nazionale del GPL devono essere conformi all'Accordo europeo ADR per quanto riguarda il trasporto su strada, al RID¹³ per il trasporto ferroviario e al regolamento ADN¹⁴ per il trasporto marittimo.

L'obiettivo della Dir.2008/68/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio è di rendere il più sicuro possibile il trasporto di merci pericolose e, allo stesso tempo, di uniformare le norme interne a quelle internazionali (ADR, RID, ADN) relative al trasporto di merci pericolose. Infatti all'articolo 3 si legge: « Al fine di instaurare un regime comune che contempli tutti gli aspetti del trasporto interno di merci pericolose, è opportuno sostituire le direttive 94/55/CE e 96/49/CE con un'unica direttiva che comprenda anche le disposizioni applicabili al trasporto mediante vie navigabili interne ».

3.3.1 Sicurezza del trasporto stradale

Dal momento che, come si è detto, in Italia il GPL viene trasportato su strada in larga misura, si approfondisce nel seguito la tematica della sicurezza del trasporto stradale.

ADR

In Italia è stato ratificato l'Accordo ADR (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road), per il trasporto internazionale nel 1962; questo è stato applicato anche al trasporto nazionale per la prima volta nel 1997, mediante il D.M. 4.9.96 del Ministero dei Trasporti.

L'accordo ADR quindi si applica a tutti i trasporti nazionali e internazionali di merci pericolose su strada. Con trasporti internazionali si intendono quelli che avvengono sia all'interno della Unione Europea, sia fra gli Stati aderenti all'accordo che non sono in essa compresi, ai trasporti su strada e a quelli intermodali che prevedono tratti del percorso su strada.

¹³RID: regolamento relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose per ferrovia, che figura come appendice C alla Pagina 2 di 17 Atto Completo convenzione sul trasporto internazionale per ferrovia (COTIF), conclusa a Vilnius il 3 giugno 1999, e successive modificazioni

¹⁴ADN: accordo europeo relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose per vie navigabili interne, concluso a Ginevra il 26 maggio 2000, e successive modificazioni

Le norme contenute nell'accordo ADR rivolgono l'attenzione anche alla prevenzione e alla protezione dai rischi, attraverso la prescrizione di dispositivi di protezione individuale, di equipaggiamento di sicurezza del veicolo, di istruzioni scritte di sicurezza, di eventuali caratteristiche particolari del veicolo e di classificazione delle gallerie .

L'ADR ha dunque emanato delle linee guida per la sicurezza del trasporto stradale di gas di petrolio liquefatti (**GPL**), che vengono classificati tra le merci della **classe 2 ad alto rischio**¹⁵.

Merci classe 2 ad alto rischio

Le merci classe 2 ad alto rischio, in base alle loro proprietà, vengono classificate come:

- **F**: infiammabile
- **T**: tossico
- **TF** : tossico, infiammabile
- **TC**: tossico, corrosivo
- **TO**: tossico, comburente
- **TFC**: tossico, infiammabile, corrosivo
- **TOC**: tossico, comburente, corrosivo

La categoria dei **GPL** rubricati in ADR ai seguenti numeri NIM (numero ONU d'identificazione delle sostanze pericolose):

- 1011 (butano);
- 1075 (gas di petrolio liquefatti);
- 1965 (idrocarburi gassosi in miscela liquefatta, miscela A, A01, A02, A0, A1, B1, B2, B, C);
- 1978 (propano);

è **2°F**, ovvero '**altamente infiammabile di classe 2**', si confronti a tal proposito la Tabella 3.3 a pag. 93.

¹⁵ alla classe 1 appartengono gli esplosivi, per la classificazione completa cfr. appendice a pag.217

Autobotti per il rifornimento

Le autobotti per il rifornimento dei piccoli serbatoi sono particolari tipi di autocisterne per GPL, sulle quali sono installati oltre che il serbatoio a pressione e i relativi accessori, anche particolari apparati per lo scarico del GPL liquido nei serbatoi dell'utenza, come pompa di bordo, conta litri, manichetta, cavi per la messa a terra e per il comando a distanza. Queste autobotti sono progettate, collaudate e costruite secondo le norme ADR del Ministero dei trasporti. Su di esse sono poi obbligatoriamente poste delle etichette romboidali di colore rosso, che riportano il disegno di una fiamma nera (Fig. 3.10), e un cartello di colore arancione catarifrangente, su cui in alto compare il numero di Kemler o NIP¹⁶, che indica il tipo di pericolo, e in basso il NIM, numero ONU d'identificazione delle sostanze pericolose (Fig.3.11) [54].



Figura 3.10: Simbolo di merce trasportata infiammabile

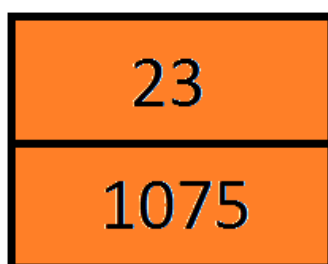


Figura 3.11: Esempio di cartello con numeri NIP e NIM: il numero di Kemler = 23 indica un liquido infiammabile, il NIM = 1075 indica gas di petrolio liquefatti

Ai fini della sicurezza del trasporto è molto importante che il personale addetto venga adeguatamente informato.

¹⁶per il codice Kemler completo si guardi in appendice a pag. 218

Le Linee Guida ADR sanciscono che le aziende debbano garantire che tutto il personale coinvolto nel trasporto delle merci pericolose sia idoneo alla mansione che deve svolgere e, in particolare, che disponga sia delle necessarie licenze, certificati e documenti operativi applicabili, sia del permesso di lavoro valido per il Paese in cui viene svolta l'attività.

Nel caso in cui un candidato fornisca informazioni false o nasconda le necessarie informazioni richieste, ciò deve costituire motivo di rifiuto a partecipare alle selezioni o, se già impiegato, motivo di licenziamento. Le aziende dovrebbero, inoltre, verificare con regolarità le licenze, i certificati e i documenti operativi applicabili necessari per lo svolgimento dell'attività.

La sicurezza del trasporto impone inoltre che gli autisti riferiscano qualsiasi fatto insolito al proprio responsabile. Essi dovrebbero sempre essere provvisti di un telefono portatile.

Gli autisti di autobotte sono poi tenuti a rispettare le seguenti regole:

- rimuovere le chiavi dal quadro di accensione, quando appropriato, e chiudere le portiere della cabina anche nel caso in cui si rechino al pagamento del carburante o ad espletare le pratiche di spedizione;
- fare rifornimento di carburante sul sito prima della partenza ogni volta che ciò è possibile;
- pianificare l'itinerario ed evitare di fermarsi per qualsiasi ragione che non sia correlata con il lavoro, come ad esempio un acquisto per motivi personali;
- non lasciare mai aperti i finestrini quando ci si allontana dal veicolo;
- utilizzare, quando possibile, parcheggi notturni stabiliti in anticipo, sicuri ed approvati;
- tenere chiuse le portiere se si dorme all'interno della cabina;
- non dare mai passaggi a persone non autorizzate e
- non abbandonare mai il veicolo senza sorveglianza, durante la notte, in aree prive di controllo o poco illuminate. Nel caso in cui lo si debba temporaneamente abbandonare, cercare di mantenere il veicolo in vista e di essere in grado di raggiungerlo rapidamente.

Inoltre tutti i trasportatori, gli speditori e gli altri operatori interessati nel trasporto di merci pericolose ad alto rischio, quali il GPL, devono adottare ed attenersi al Piano di Security (ADR), atto a identificare e ridurre i rischi di sicurezza relativi al trasporto di merci pericolose.

Esso tiene in conto dei tipi e delle quantità di merci pericolose trasportate e delle loro modalità di trasporto.

Tabella 3.3: GPL come merce pericolosa di classe 2 ad alto rischio

Sostanza	Classe	Ordinale	Kemler (pericolo)	ONU (materia)
Propano commerciale	2	2°F	23	1965
Altre miscele commerciali	2	2°F	23	1965
Propano	2	2°F	23	1978
Butano	2	2°F	23	1011

Serbatoi da autotrazione

L'utilizzo del GPL come combustibile da autotrazione merita un discorso a sé. La sicurezza dei veicoli alimentati a GPL si basava fino al 1999 sulle disposizioni per l'omologazione dei componenti previste dal regolamento ECE/ONU n.67 risalente al 1967. Recentemente l'entrata in vigore dell'emendamento 01 al suddetto Regolamento ha imposto da un lato test molto più severi che in passato, per l'omologazione dei componenti dell'impianto (cicli di temperatura, prove di durata, prove di vibrazione, prove di fuoco, ecc.), e dall'altro ha introdotto una serie di dispositivi atti ad accrescere il livello di sicurezza degli autoveicoli in tutte le possibili situazioni.

I serbatoi di GPL montati sulle auto sono infatti dotati di numerosi dispositivi di sicurezza [1] obbligatori:

1. un'elettrovalvola posta sul serbatoio, al fine di confinare il GPL all'interno del serbatoio a motore spento;;
2. una valvola limitatrice di riempimento;
3. una valvola di sovrappressione che garantisce, anche in caso di sovrariempimento, valori di pressione all'interno del serbatoio compatibili con la resistenza del materiale;

4. una valvola termofusibile, o altro dispositivo analogo, allo scopo di far fuoriuscire il GPL in caso di incendio, svuotando il serbatoio ed evitandone lo scoppio.

Il serbatoio di GPL è costruito inoltre con una lamiera d'acciaio di 3,5 mm ed è trattato termicamente per evitare fessurazioni in caso di deformazioni in seguito ad un incidente. Il serbatoio per le auto a benzina è invece in plastica. Il primo è omologato per pressioni non inferiori a 30 bar (la pressione al suo interno oscilla tra 3 e 6 bar), il secondo fonde a 160-170°C e si rammollisce a 120°C.

Nel GPL le tubazioni sono in metallo, mentre per la benzina sono in plastica o in gomma. I veicoli alimentati a GPL subiscono inoltre crash-test e fire-test, per verificare il grado di sicurezza di valvole e serbatoi. Inoltre le prove del fuoco hanno dimostrato che in caso di incendio il volume di fiamma sarebbe più circoscritto di quello provocato da una fuoriuscita di benzina, che tende a espandersi sul terreno circostante[7].

Statisticamente gli incidenti pericolosi che riguardano le vetture alimentate a GPL non sono superiori a quelli per le vetture alimentate a benzina o gasolio.

Nella tabella che segue sono elencate le prove richieste per l'omologazione di un componente GPL. Nella colonna di sinistra sono riportate le prove richieste in passato, in quella di destra, quelle previste ai sensi del nuovo Regolamento ECE/ONU 67/01 in vigore da novembre 1999.

Tabella 3.4: Prove sui componenti dell'impianto GPL per autotrazione

Regolamento ECE/ONU 67	Regolamento ECE/ONU 67/01
• Compatibilità al GPL • Prova di pressione/perdite • Prova di durata (20 cicli) • Misura isolamento circuito	• Compatibilità al GPL • Prova di pressione/perdite • Prova di durata (6.000 cicli) • Misura isolamento circuito • Prova alta temperatura (120°C) • Prova bassa temperatura (-20°C) • Prova vibrazioni • Resistenza alla corrosione (nebbia salina 144 ore) • Prova calore secco • Prova invecchiamento ozono • Prova cicli di temperatura. Per la sola centralina elettronica: • Prova compatibilità elettromagnetica

3.3.2 Sicurezza del trasporto ferroviario

Come è stato ricordato all'indomani dell'incidente di Viareggio, e come si è diffusamente trattato nel Capitolo 1, il GPL è trasportato in forma liquida sotto una modesta pressione: questo fa sì che fuoriuscendo dal contenitore fratturato evaporino quasi istantaneamente e si trasformi in gas, un gas più pesante dell'aria, che tende a rimanere vicino al suolo, trasformandosi in una nube infiammabile che, se efficacemente innescata, può esplodere.

Ancorché questa ipotesi incidentale abbia una bassa probabilità di verificarsi, quando un treno deraglia può dar luogo sia alla rottura fisica del contenitore, sia alla generazione di scintille, che possono così innescare l'esplosione del GPL.

La pericolosità del GPL è pertanto nota, tanto che viene trasportato in contenitori speciali, controllati e verificati periodicamente.

Il trasporto su rotaia del GPL è considerato inoltre molto più sicuro di quello su gomma, al punto che, ad esempio, come si è già detto, in Germania è obbligatorio per tratte superiori ai 200 Km.

Le ragioni dell'incidente di Viareggio andrebbero pertanto ricercate nelle modalità di verifica dell'integrità dei vagoni ferroviari più che nelle caratteristiche intrinseche di pericolosità del GPL [1]. All'incidente in questione e alle problematiche relative al trasporto delle merci pericolose sono stati dedicati molti interventi della 6^a Edizione della conferenza logistica, organizzata nel luglio 2009 da Federchimica. Nel corso dei lavori è emerso che le condizioni di sicurezza del trasporto ferroviario, in Italia come anche nel resto d'Europa, sono regolate da severe norme tecniche contenute in Direttive e Regolamenti Comunitari ¹⁷ per quanto attiene sia la manutenzione, sia la circolazione dei carri ferroviari.

L'incidentalità nel settore del trasporto ferroviario di merci in Italia è tra le più basse d'Europa e, dalle statistiche internazionali, risulta che i livelli di sicurezza delle Ferrovie dello Stato sono allineati a quelli delle principali reti europee (Figura 3.12). E' opinione diffusa che le modalità da adottare, per prevenire gli incidenti come quelli di Viareggio e ridurre i rischi associati al trasporto ferroviario di merci pericolose, dovrebbero passare attraverso l'emanazione di norme volte a stabilire criteri di certificazione comuni a tutti gli Stati membri e per l'individuazione di officine di manutenzione certificate UE, anche sulla base delle raccomandazioni presentate dall'Agenzia ferroviaria europea (ERA) alla Commissione Europea.

¹⁷cfr. pag. 96

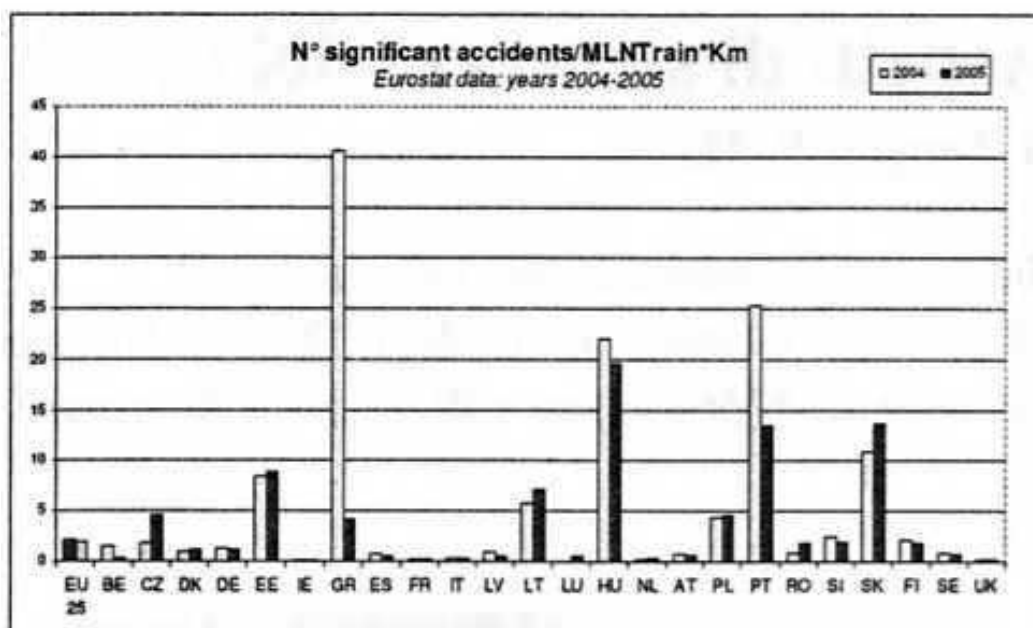


Figura 3.12: Numero di Incidenti rilevanti nell'UE per il biennio 2004-2005 (fonte Eurostat)

La stessa Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria (ANSF), in un rapporto del 2008, ha indicato quale criticità del sistema la verifica del rispetto delle periodicità previste, il monitoraggio delle scadenze e la rintracciabilità dei processi per la manutenzione del materiale rotabile.

Altro aspetto da affrontare, soprattutto per una rete commerciale fortemente interconnessa con quella per il trasporto passeggeri, è la realizzazione di nuove linee specializzate che consentano di far transitare rilevanti correnti di traffico merci, e tra queste soprattutto quelle pericolose, al di fuori delle grandi aree urbanizzate.

Questo aspetto dovrebbe essere incoraggiato anche dai vantaggi che tali linee specializzate hanno assicurato nelle aree in cui sono già in esercizio.

In ultimo, molti osservatori affermano che sarebbe auspicabile la realizzazione di un archivio centrale informatizzato che permetta la piena tracciabilità delle merci pericolose che percorrono la rete ferroviaria italiana.

Normativa di riferimento

Il trasporto ferroviario di sostanze pericolose è contemplato nel Piano Operativo Merci Pericolose varato da RFI (Rete Ferroviaria Italiana) su base volontaria nel 2001.

In particolare da citare è il D.P.R. 146 - Articoli 7 e 11, in cui viene stabilito l'obbligo, da parte delle Imprese Ferroviarie che esercitano sull'infrastruttura ferroviaria nazionale di

servizi di trasporto di merci e di persone, di osservanza delle disposizioni e prescrizioni emesse dal gestore dell'infrastruttura in materia di requisiti di sicurezza applicabili al personale.

Inoltre si deve prendere in considerazione la 'Disposizione n. 04/2001', che detta le regole per il trasporto di merci pericolose sulle linee FS indicando i testi normativi e le circolari ministeriali relativi al trasporto delle merci pericolose per ferrovia, dal momento dell' accettazione a quello della riconsegna delle merci al cliente. Sono ivi compresi gli obblighi organizzativi e strutturali da soddisfare negli scali e fissa altri adempimenti di dettaglio relativamente alle manovre a gravità ed alla gestione dell'emergenza.

Per quanto riguarda il trasporto su rotaia, si deve citare inoltre il D.M. 16 gennaio 2001 che prescrive verifiche del materiale rotabile ad intervalli prefissati (mediamente 5 anni per i carri cisterna) indipendentemente dal fatto che il vagone abbia percorso 100 o 1.000.000 di km). E' necessario quindi disporre verifiche in base ad un chilometraggio prefissato oltre che a periodi di tempo definiti.

CAPITOLO 4

SCENARI INCIDENTALI DA RILASCIO DI GPL

Gli incidenti che vedono coinvolte perdite accidentali di gas di petrolio liquefatti possono tradursi in danni molto gravi alle persone e alle strutture adiacenti alla scena incidentale, come ci ha tristemente ricordato il deragliamento, avvenuto a Viareggio, del treno merci che il 29 giugno 2009 trasportava, per l'appunto, GPL.

Come già si è detto la pericolosità del GPL deriva dalla sua infiammabilità e dalla sua tendenza a formare una densa nube di vapore se disperso in atmosfera. Il fatto che venga trasportato in forma liquida sotto una modesta pressione fa sì che, fuoriuscendo dal contenitore fratturato, evaporanti istantaneamente e si trasformi in gas. Poiché il GPL in stato gassoso è più pesante dell'aria, tende a rimanere vicino al suolo, trasformandosi in una nube infiammabile che, se efficacemente innescata, può esplodere.

L'approccio che ha portato alla stesura delle seguenti pagine è quello dettato dalla disciplina di gestione dei rischi rilevanti (Major Hazards Management) [61]: sulla base dell'albero d'evento che descrive il rilascio di GPL e le relative possibili conseguenze incidentali, si sono analizzate dapprima le diverse modalità di formazione della nube di vapore (e.g. rilascio continuo vs. rilascio improvviso, fattori di dispersione etc...) e successivamente sono stati studiati i diversi fenomeni pericolosi causati dall'ignizione della nube stessa (flash fire, pool fire, fire balls etc...), per distinguerli dalle UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosions), materia d'approfondimento del successivo capitolo.

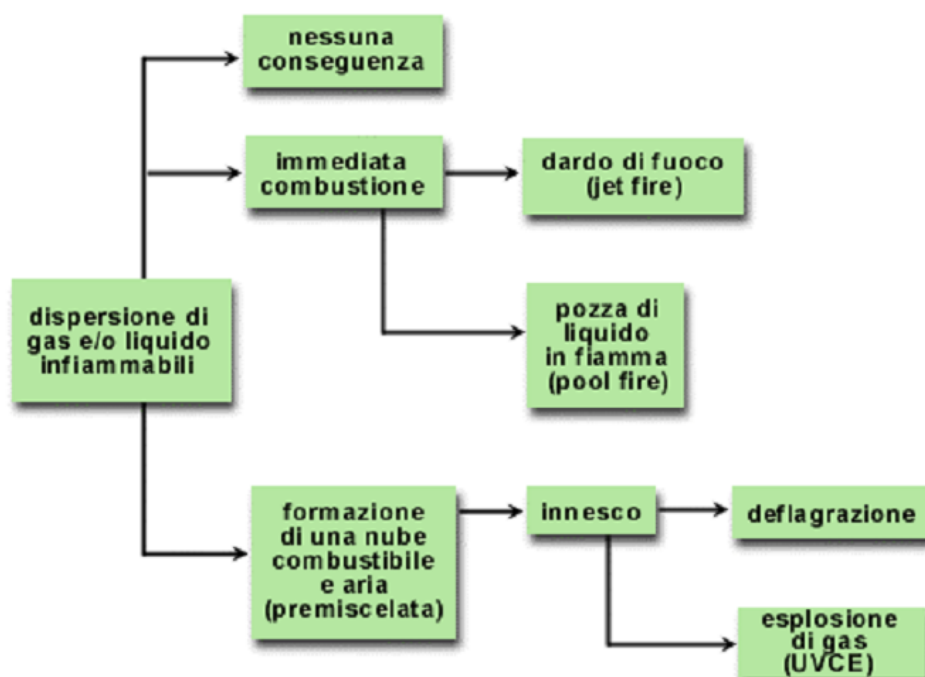


Figura 4.1: Un generico albero d'evento che mostra le conseguenze tipiche da rilascio accidentale di combustibile gassoso o liquido che evapora in atmosfera[59].

Infine l'ultima parte del capitolo affronta il problema della stima degli effetti associati alla perdita accidentale di GPL durante incidenti nei quali viene trasportato su rotaia, come nell'increscioso caso di Viareggio.

4.1 Introduzione agli scenari da rilascio di GPL

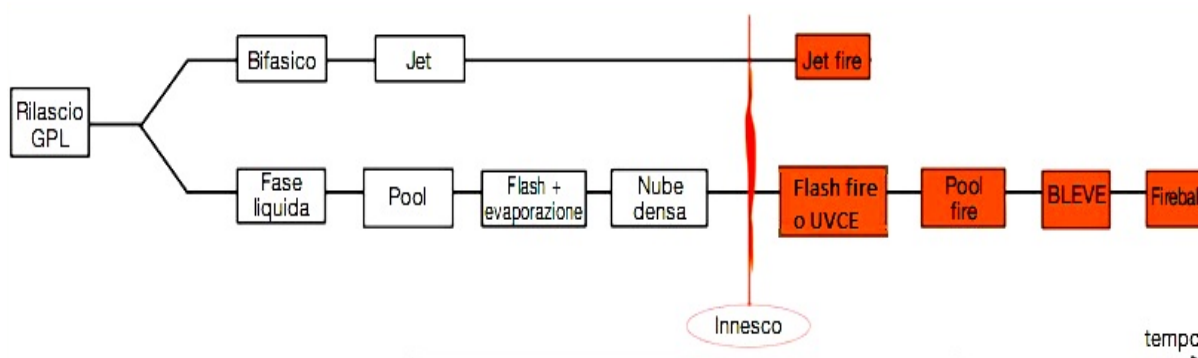


Figura 4.2: Albero d'evento che mostra la possibile evoluzione di scenari conseguenti al rilascio di GPL

Il susseguirsi dei possibili fenomeni conseguenti al rilascio di GPL dovuto ad una qualsivoglia causa, come la perdita da una valvola del serbatoio, un errore durante la fase di travaso, la formazione di una falla sul serbatoio per urto o un ribaltamento, è in generale schematizzabile nella sequenza cronologica rappresentata in Figura 4.2.

A seguito della perdita di GPL liquido, parte di esso evapora per **flash isoentalpico**, mentre la frazione di GPL sottoraffreddato va a formare una **pozza**, da cui ha luogo un'ulteriore evaporazione. Evaporando la nube stratifica nelle quote basse, essendo il peso specifico del GPL maggiore dell'aria, e si disperde secondo meccanismi di diluizione. Due sono i fattori che determinano la diluizione di una nube di vapore di GPL:

- ✓ **il vento** (direzione e velocità): determina l'allontanamento della nube dalla fonte di dispersione;
- ✓ **la turbolenza**: determina la diluizione della nube e il suo miscelamento con l'aria. Essa dipende dall'instabilità dell'aria che è funzione del gradiente verticale di temperatura. In generale condizioni di instabilità si verificano quando il sole scalda il terreno provocando moti convettivi turbolenti; condizioni di stabilità atmosferica si instaurano invece ad esempio di notte (si veda la Tabella delle classi di stabilità di Pasquill a pag.224 in appendice A.4.2).

Inoltre il vapore di GPL, essendo più denso dell'aria, tende a rimanere vicino al suolo e a infiltrarsi nelle quote basse di volumi confinati come locali e fabbricati limitrofi (e.g. abitazioni e uffici). In tal caso, se innescata, la nube può dar luogo ad esplosioni in volumi confinati (CVE, **Confined Vapor Explosions**).

Un altro fattore da cui dipende la dispersione della nube è la conformazione dell'area circostante il rilascio, ossia la presenza di edifici o impianti che possono ostacolarne la diluizione e variare le condizioni di turbolenza.

Se la nube si trova nel campo di infiammabilità e trova una fonte di innesco si genera l'incendio della massa nuvolosa di vapore infiammabile, con effetto non esplosivo, noto come **flash fire**. Per il tempo intercorrente tra l'inizio del rilascio ed il flash, in relazione alle variabili suddette, la letteratura ci segnala casi in cui si è manifestato 5 minuti dopo, altri fino a 50 minuti.

La durata del flash fire (o incendio di nube) è in genere dell'ordine di qualche secondo (3-5 secondi) e la sua pericolosità deriva dalla radiazione termica prodotta. Tuttavia in particolari condizioni tale nube può anche esplodere con effetti più devastanti (onda di pressione). La probabilità che una nube di GPL determini l'esplosione della stessa

(nota in letteratura come **Unconfined Vapour Cloud Explosion**, UVCE) anziché un flash fire, dipende essenzialmente dalla geometria del luogo ove la nube si estende (in particolare quanto più è vicina alla concentrazione stechiometrica), e soprattutto dalla massa di prodotto che si trova nel campo di infiammabilità.

In particolare la probabilità d'esplosione diventa significativa quando [62]:

- il rilascio interessi un ambiente essenzialmente chiuso;
- la quantità di vapori entro i limiti in infiammabilità sia maggiore di una tonnellata se in ambiente parzialmente confinato, ad esempio in presenza di grossi edifici o apparecchiature industriali nello spazio di sviluppo della nube;
- la quantità di vapore entro i limiti di infiammabilità sia maggiore di 5 tonnellate se in ambiente non confinato.

Proseguendo nel percorso degli eventi rappresentati in Figura 4.2, il flash innesca l'incendio della pozza, noto in letteratura come **pool fire**.

Infine se la rottura del serbatoio consiste in uno squarcio di notevole entità, è molto probabile che si verifichi un fenomeno di esplosione fisica del fluido ivi contenuto nota in letteratura come **Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion** (BLEVE). Nel caso specifico del GPL, in caso di innesco, l'esplosione (BLEVE) è seguita dal **fireball**. Infatti al momento del cedimento strutturale del serbatoio il liquido, vaporizzando istantaneamente per flash, forma un volume sferico di gas la cui superficie esterna brucia formando per l'appunto un fireball, mentre l'intera massa si solleva per effetto della riduzione di densità indotta dal surriscaldamento.

Nel presente paragrafo si sono sintetizzati, in maniera estremamente qualitativa, quelle che sono le principali sequenze incidentali conseguenti ad un rilascio accidentale di GPL liquido [63]. Nel seguito, seguendo l'albero d'evento (Event Tree), ciascuna voce in Figura 4.2 viene analizzata e approfondita nel dettaglio.

4.2 Sorgente di rilascio

Come è noto, molti incidenti in ambito industriale e civile iniziano proprio con il rilascio di una certa quantità di sostanze tossiche o infiammabili in atmosfera. La valutazione dei parametri rappresentativi della fonte di rilascio è molto importante per la stima delle conseguenze degli eventi seguenti, quali la dispersione in atmosfera, l'incendio o l'esplosione della sostanza scaricata.

Si procede quindi definendo gli input richiesti da un generico modello di dispersione di gas o di esplosione di nube di vapore (**Vapor Cloud Explosion**, VCE), o da qualsiasi altro modello d'impatto: i cosiddetti **termini di sorgente**, che sono le uscite (*output*) del **modello di sorgente**. Questi descrivono la velocità del flusso e la quantità di sostanza pericolosa coinvolta. Ovviamente la loro formulazione può variare a seconda del modello d'impatto considerato. In generale le informazioni necessarie a caratterizzare un rilascio in atmosfera sono:

- **portata rilasciata**, che dipende da:
 - *modalità di rilascio*: da un piccolo foro o fessura, da una tubazione fratturata o dalla rottura catastrofica del serbatoio;
 - *condizioni termodinamiche del fluido*: pressione e temperatura; in particolare se il fluido è un liquido mantenuto nel contenitore a temperatura superiore a quella di ebollizione a pressione atmosferica (per il GPL pari a circa - 40°C), esso subisce un violento **flash**¹ spontaneo se rilasciato all'esterno;
 - *posizione* del foro o della fessura;
 - *fase del fluido rilasciato*: liquido, gas o bifase.
- **durata del rilascio**
- **quantità e composizione del vapore disperso**, calcolando:
 - la frazione di liquido rilasciato che vaporizza istantaneamente (*frazione di flash*);
 - la frazione di liquido trascinata dal vapore sotto forma di aerosol, che conseguentemente evapora anch'esso (cfr. 105).
 - la velocità di evaporazione di qualsiasi pozza di liquido si formi a causa del rilascio.

E' importante notare che il calcolo dei *termini di sorgente* costituisce una fase critica per la valutazione delle conseguenze degli eventi seguenti. Infatti, a causa della natura stessa dell'invento incidentale, solitamente è possibile effettuare solo una stima abbastanza grossolana di molti parametri indispensabili per il calcolo della portata scaricata, come

¹il flash (isoentalpico) del liquido consiste nella sua istantanea evaporazione parziale, cfr. pag.104. Il vapore prodotto dal flash, in una miscela multicomponente come il GPL, sarà maggiormente ricco dei componenti più volatili, e quindi in particolare di propano.

ad esempio la pressione a monte dello scarico o le dimensioni della rottura attraverso cui fuoriesce il fluido. È quindi necessario considerare la situazione ragionevolmente peggiore, cioè quella combinazione di parametri operativi che portano alle conseguenze più gravose, rimanendo però all'interno di valori dei parametri stessi credibili.

Inoltre il modello di sorgente stesso introduce delle ipotesi semplificative, poichè questo (e di conseguenza i modelli di dispersione di gas) di solito descrive alternativamente un **rilascio continuo**, oppure un improvviso **rilascio istantaneo**.

Ovviamente, nessun fenomeno è realmente istantaneo, ma può essere così approssimato quando la durata dello scarico è molto inferiore ai tempi caratteristici dei fenomeni successivi, tipicamente la dispersione in atmosfera, il cui tempo caratteristico può essere stimato come il rapporto tra la distanza della sorgente dal ricettore e la velocità del vento. Quindi, mentre il collasso di un recipiente viene solitamente modellato come un rilascio istantaneo, il rilascio da una rottura non catastrofica viene considerato istantaneo se:

$$t_s \ll \frac{d}{u_v}$$

dove t_s è la durata dello scarico, d la distanza tra la sorgente e il ricettore² considerato e u_v la velocità media del vento, e continuo³ se;

$$t_s \gg \frac{d}{u_v}$$

Spesso quando si verifica un rilascio importante per un periodo breve, seguito da un rilascio modesto prolungato nel tempo, la cosa migliore da fare è modellare il guasto sia come perdita istantanea, sia come perdita continua, e tenere in considerazione la condizione più gravosa.

4.2.1 Meccanismi di evaporazione e loro evoluzione temporale

In generale la velocità di evaporazione (*vapour rate*) di un generico liquido rilasciato è tutt'altro che costante ed è il risultato di più meccanismi concorrenti, descritti nel seguito. Sovente diminuisce con il passare del tempo, dal momento che, mano a mano

²Si definisce ricettore un qualsiasi bersaglio degli effetti acuti di un incidente.

³I rilasci continui possono a loro volta essere suddivisi in rilasci stazionari e transitori. Anche in questo caso ovviamente la distinzione deve essere intesa dal punto di vista del modello utilizzato per la stima del termine di sorgente, in quanto tutti i rilasci sono intrinsecamente non stazionari. D'altro canto, un rilascio attraverso una piccola apertura che non modifica significativamente le condizioni operative nelle apparecchiature a monte può essere ragionevolmente considerato stazionario.

che la fuoriuscita prosegue, si ha il contemporaneo crollo della pressione e del carico nell'apparecchiatura di contenimento.

In Figura 4.3 viene mostrato l'andamento della portata di vapore generata dal liquido in funzione del tempo per due differenti tipi di rilascio in ambiente. Le due curve sono diverse poichè i vari meccanismi di evaporazione contribuiscono in misura diversa in base alla fase, alla composizione e alla durata del rilascio.

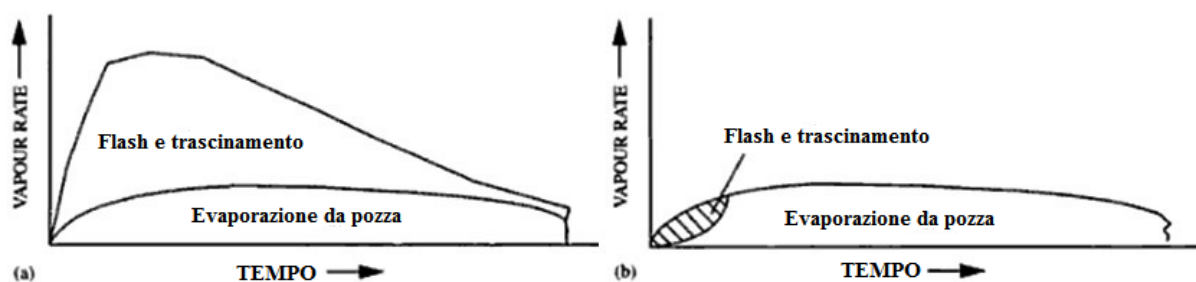


Figura 4.3: Evoluzione temporale della generazione di vapore dal liquido rilasciato [61]

- L'immagine a) descrive il comportamento evaporativo dei **gas liquefatti**: la generazione di vapore è dominata dall'evaporazione flash e dall'evaporazione delle goccioline di liquido trascinate dal flusso di vapore.
- L'immagine b) descrive invece il comportamento evaporativo di un **liquido volatile**: in questo caso è l'evaporazione da pozza, (*pool evaporation*), a dominare la generazione di vapore.

In sintesi i meccanismi di evaporazione che interessano un rilascio di gas liquefatto per compressione sono:

1. **evaporazione flash** (*flash evaporation*): consiste nell'evaporazione sostanzialmente immediata di una parte del liquido. Quando viene rilasciato in ambiente un gas liquefatto per compressione, durante lo scarico il liquido sperimenta pressioni decrescenti fino al valore ambiente. Ovviamente a pressione ambiente il liquido si trova in condizioni di non equilibrio termodinamico in quanto la sua temperatura è superiore a quella di ebollizione alla pressione ambiente (liquido surriscaldato) e tende perciò ad evaporare rapidamente secondo il fenomeno noto appunto come *flash*. Il calore necessario per l'evaporazione viene recuperato attraverso uno scambio termico col liquido stesso che quindi si raffredda fino alla sua temperatura di ebollizione normale in cui raggiunge le condizioni di equilibrio. Si noti che solo i gas liquefatti per compressione (come il GPL) possono dare flash in

quanto la temperatura a cui vengono scaricati (che è pari a quella a cui vengono stoccati, cioè la temperatura ambiente) è superiore alla loro temperatura di ebollizione normale, mentre il gas liquefatti per raffreddamento (per esempio, GNL) non possono dare flash in quanto la temperatura a cui vengono scaricati (che è pari a quella a cui vengono stoccati, cioè la loro temperatura di ebollizione normale) non è superiore ma uguale alla loro temperatura di ebollizione normale; gas liquefatti per raffreddamento evaporano più lentamente rispetto al flash per scambio termico con l'ambiente esterno.

Lo stato finale della trasformazione dipende dall'analisi che si vuole effettuare: se si considera come stato finale il getto di fluido in movimento la trasformazione può solitamente essere considerata isoentropica, mentre se lo stato finale viene considerato in quiete la trasformazione può essere approssimata come isoentalpica. Solitamente, anche se non sempre, le differenze tra le due situazioni sono trascurabili [65]. Inoltre il flash può indurre un'ulteriore **evaporazione da trascinamento** (*entrainment*): la violenta evaporazione di parte del liquido a causa del flash comporta la formazione di goccioline di liquido, che vengono trascinate dal flusso di vapore. Se le gocce sono di dimensioni sufficientemente piccole⁴ rimangono in sospensione nell'aria (**aerosol**⁵) per un tempo sufficiente a evaporare.

2. **evaporazione da pozza** (*pool evaporation*): la frazione di liquido che non evapora istantaneamente (flash) e non rimane inglobata nella nube come aerosol forma una pozza che evapora. In questo caso il meccanismo di generazione di vapore è evidentemente più lento rispetto al flash. La pozza è costituita quindi anche dalle gocce di liquido che, superando una certa dimensione critica, ricadono al suolo (*rain out* [65]). A seconda delle proprietà chimico fisiche del composto diversi fenomeni controllano la velocità di evaporazione da pozza. Nel complesso, i fenomeni che causano la evaporazione di un liquido sono il trasporto di materia, legato ai gradienti di concentrazione tra la superficie del liquido e l'atmosfera circostante, e il riscaldamento dovuto allo scambio termico con l'atmosfera, all'irraggiamento solare e allo scambio termico col terreno sottostante. Questi scambi termici sono bilanciati dal calore necessario al liquido per la sua parziale evaporazione. Il trasporto di materia è il fenomeno controllante nel caso di liquidi non

⁴Gocce di dimensioni inferiori ai 100µm se la velocità del vento è superiore ai 2 m/s e il rilascio avviene ad almeno 1-2 m dal suolo [65].

⁵**Aerosol**: è una nebbia di goccioline sufficientemente piccole da non ricadere al suolo, ma da rimanere sospese in aria comportandosi essenzialmente come un gas.

bollenti, caratterizzati cioè da una temperatura di ebollizione normale superiore alla temperatura ambiente (e.g. benzina $T_{eb} = 80 - 100^{\circ}\text{C}$), mentre gli scambi termici di varia natura controllano la evaporazione di gas liquefatti per raffreddamento, come il GNL (gas naturale liquefatto).

Tornando all'oggetto di questa trattazione, il GPL, in quanto gas di petrolio liquefatto per compressione, presenta tutte e due le componenti di vaporizzazione: il flash (+ evaporazione aerosol) e l'evaporazione da pozza, come mostrato in Fig.4.3.

Riassumendo:

allo scarico il GPL vaporizza parzialmente (flash), trascinando con sé una considerevole quantità di liquido sotto forma di aerosol. Il liquido non trascinato, giunto alla sua temperatura di ebollizione a pressione atmosferica, forma una pozza che evapora[65].

Il flash del GPL è quindi una trasformazione (espansione isoentalpica) che ripristina la condizione di equilibrio, riportando quasi istantaneamente la temperatura del liquido alla temperatura di ebollizione a pressione atmosferica ($\sim -42^{\circ}\text{C}$ per il propano puro), generando così vapore.

Inoltre è importante notare che la frazione di liquido trascinata, sotto forma di gocce, dalla violenza del flash è solitamente pari alla frazione che originariamente subisce il flash, pertanto in alcune miscele GPL gran parte del gas liquefatto viene vaporizzato, se esposto alla pressione atmosferica, prima che si possa formare la pozza [64].

Inoltre come mostrato in Figura 4.3 per quanto riguarda i gas liquefatti i due tipi di evaporazione⁶ (flash+trascinamento ed evaporazione da pozza) sono paralleli, nei liquidi volatili sono consecutivi [55].

⁶Si noti che non esiste in letteratura nessun caso di incidente con esplosione di nube di vapore (VCE, Vapour Cloud Explosion) che sia stato causato esclusivamente dall'accumulo di vapore derivante dall'evaporazione di una pozza di liquido. Il problema è sempre stato individuato nel vapore dovuto all'istantanea evaporazione flash [55].

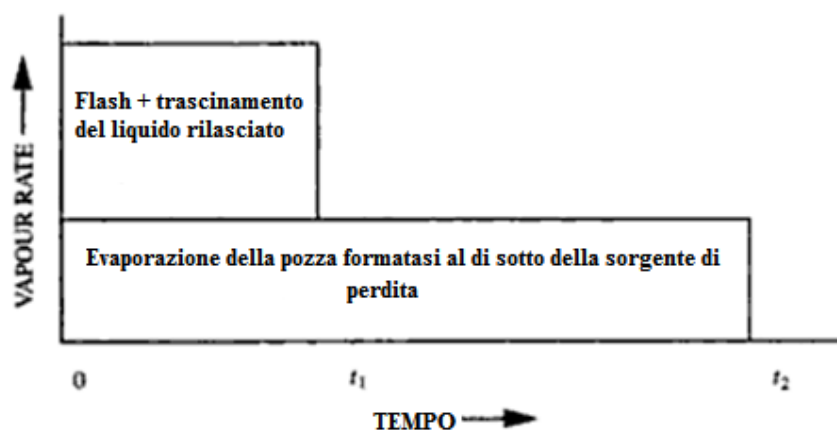


Figura 4.4: Generazione di vapore da cedimento catastrofico del serbatoio o da tubazione fratturata:

- t_1 tempo per l'isolamento in caso di rottura del tubo,
- t_2 tempo necessario alla pozza per evaporare.

Infine bisogna considerare che i meccanismi di evaporazione del liquido disperso accidentalmente dipendono anche dalle modalità di rilascio. In Figura 4.4 è presentata la generazione di vapore, in funzione del tempo, a seguito della rottura di una tubazione o del cedimento catastrofico di un serbatoio, che può essere modellato come un rilascio istantaneo. In Figura 4.5 si può invece osservare il comportamento evaporativo del liquido che fuoriesce da un foro in un serbatoio, che può essere invece modellato come un rilascio continuo.

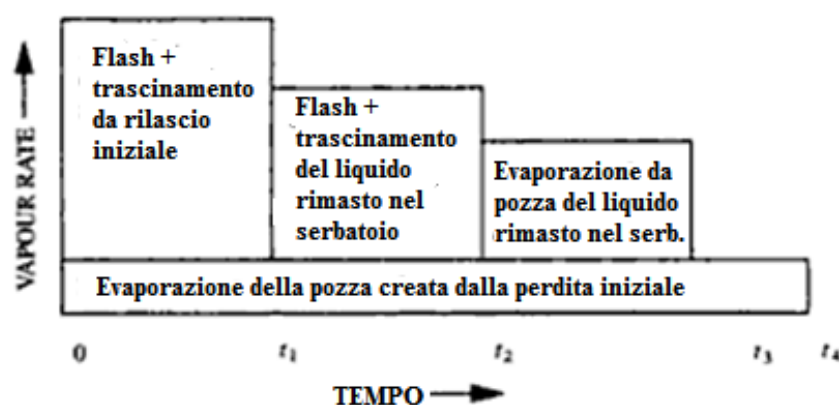


Figura 4.5: Generazione di vapore da serbatoio forato:

- t_1 tempo di scarico del liquido fino al livello del foro,
- t_2 flash e trascinamento del liquido rimanente nel serbatoio,
- t_3 il resto del contenuto del serbatoio evapora,
- t_4 tempo di vaporizzazione della pozza generata dal rilascio iniziale.

4.2.2 Calcolo dei termini di sorgente

I *termini di sorgente* in uscita dal modello di sorgente da dare in ingresso a un generico modello di dispersione di gas sono (cfr.[61],[65]) riassunti in Tabella 4.1. Questi dati sono necessari per la successiva valutazione della dispersione in atmosfera.

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. portata e quantità totale scaricata,2. frazione di flash e formazione di aerosol,3. portata di evaporazione da pozza di liquido,4. composizione, temperatura e densità del vapore. |
|--|

Tabella 4.1: Termini di sorgente

Portata scaricata

La prima valutazione da effettuare per il calcolo della portata scaricata $\dot{m}_{disch}$ riguarda la fase che viene scaricata: liquido, gas o miscela bifase.

La fase della sostanza scaricata non dipende in modo univoco dalla posizione della rottura ma anche dalle condizioni operative all'interno del recipiente. Nel caso di un recipiente di GPL, se il foro è collocato nella parte alta l'efflusso sarà gassoso(vapore). Tuttavia se la falla nel contenimento si colloca in corrispondenza della parete bagnata dal liquido, cioè nella parte bassa del recipiente, non è detto che il materiale venga scaricato in fase liquida. Essendo la sua temperatura di ebollizione normale (cioè a pressione ambiente) inferiore alla temperatura ambiente, come si è già visto, si ha una rapida evaporazione di parte del liquido (flash). Tuttavia il flash, per quanto rapido, impiega un tempo finito a realizzarsi (dovuto alla nucleazione e alla crescita delle bolle); ne segue che, se i tempi di residenza nel contenitore sono sufficienti affinché il flusso di GPL liquido si porti in condizioni di equilibrio evaporando parzialmente (flash), allora la portata scaricata sarà una miscela bifase, con il vantaggio dello strozzamento del flusso in uscita da parte del vapore; se invece i tempi di residenza sono troppo brevi, come generalmente accade nel caso di perdita da un foro, il GPL viene scaricato come liquido e il flash avviene all'esterno (flusso di non equilibrio). In questo caso la portata scaricata è molto maggiore, poichè non si verifica lo strozzamento ⁷.

⁷Si confronti il concetto di 'non equilibrium flow' a pag.227

Per valutare le condizioni del fluido scaricato è quindi necessario conoscere la trasformazione termodinamica che il fluido compie durante il processo di scarico, partendo dalle condizioni all'interno dell'unità di processo (o di contenimento) fino a uno stato finale, solitamente a pressione atmosferica.

Lo stato finale dipende dall'analisi che si vuole effettuare: se si considera come stato finale il **getto di fluido** in movimento (per esempio lo scarico di un gas attraverso una valvola di sicurezza che va a formare un getto) la trasformazione può solitamente essere considerata **isoentropica**, mentre se lo stato finale viene considerato in quiete (per esempio una pozza di liquido) la trasformazione può essere approssimata come **isoentalpica**.

In ogni caso un bilancio di energia, accoppiato con delle relazioni di equilibrio termodinamico nel caso in cui si abbia la presenza di una miscela bifase, consentono la valutazione dello stato del fluido scaricato.

A parte le condizioni del fluido scaricato, la valutazione della portata scaricata richiede l'assunzione di una **sezione di scarico**. Se il rilascio avviene attraverso un dispositivo di scarico di emergenza la sezione è nota, mentre se si ipotizza una rottura la dimensione deve essere ipotizzata sulla base della tipologia di incidente analizzata (per esempio, rottura di un tronchetto di tubazione, perdita da flangia, collasso catastrofico di un recipiente). Non vi è un consenso generale sulla sezione di rottura da ipotizzare per le tubazioni, (cfr. Appendice a pag.A.4) e le assunzioni possono essere anche marcatamente differenti, portando di conseguenza a significative differenze nella stima finale delle conseguenze. Considerazioni analoghe valgono per la rottura di recipienti o perdite da flange. Purtroppo, come detto, non vi è un consenso unanime sulle ipotesi migliori per definire la sezione di scarico. L'analista deve quindi effettuare una scelta e motivarla adeguatamente sulla base delle ipotesi incidentali effettuate.

Analoghi problemi nascono nella **definizione della durata del rilascio**. Nell'ambito della modellazione delle conseguenze di incidenti industriali sono molto utilizzate delle assunzioni generali (tipo 3 o 10 minuti) per tutte le situazioni. Tuttavia, dal momento che le conseguenze finali possono essere condizionate in modo significativo dalla durata del rilascio esso dovrebbe essere stimato sulla base dei tempi caratteristici dei sistemi di rilevazione della perdita e di intervento per l'isolamento della sezione interessata dalla perdita realmente esistenti nell'impianto analizzato.

Un'altra assunzione usuale è quella di calcolare la portata scaricata nelle condizioni iniziali, trascurando il fatto che solitamente si ha un rilascio non stazionario la cui portata diminuisce col passare del tempo a causa della depressurizzazione delle unità d'impianto a monte e valle della rottura. Il considerare solo la portata iniziale conduce a

valutazioni conservative, che possono però essere eccessivamente gravose. Analoghe considerazioni valgono per la presenza sulla linea di collegamento tra il punto di rottura e l'unità d'impianto di pompe, valvole o altre restrizioni che possono limitare la portata scaricata.

L'equazione di partenza per il calcolo della portata scaricata è, in tutti i casi, il bilancio di energia meccanica in regime stazionario:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + g\Delta z + \sum K_f \frac{u^2}{2} \quad (4.1)$$

dove Δ indica una differenza tra una sezione dell'impianto e la sezione a valle della perdita, P è la pressione, ρ la densità, u la velocità, z la quota (altezza piezometrica) e la sommatoria rappresenta le perdite di carico per attrito, cioè la velocità di trasformazione irreversibile di energia meccanica in energia termica, dovuta al flusso lungo le tubazioni, gomiti, valvole, orifici, entrata e uscita dalle tubazioni, ecc...

I valori dei coefficienti K_f possono essere calcolati attraverso il fattore di attrito di Fanning (f) per il flusso nelle tubazioni con relazioni del tipo:

$$K_f = K_c + 4f \frac{L}{D}$$

dove L è la lunghezza del tubo, D il diametro e $0 < K_c < 0,5$ è un coefficiente di perdita di carico in ingresso al tubo.

E' poi importante precisare che se si tratta di un foro in un recipiente la portata scaricata viene definita dalla pressione nel serbatoio e dalla dimensione del foro. Se viceversa la rottura avviene in una tubazione, la portata dipende dalla configurazione del sistema a monte.

- **Efflusso liquido monofase:** nel caso di liquidi incompressibili l'integrale presente nel bilancio di energia meccanica (eq.4.1) può essere facilmente risolto, essendo la densità costante. Approssimando le perdite di carico attraverso un coefficiente di efflusso c_D costante e definito come:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + g\Delta z + \sum K_f \frac{u^2}{2} = c_D^2 \left(\int \frac{dP}{\rho} + g\Delta z \right)$$

si giunge alla classica espressione per la portata massica scaricata, $\dot{m}_{disch}$, attraverso un foro di sezione A_f in un serbatoio, che secondo Van der Bosch e Duijm [66] vale:

$$\dot{m}_{disch} = \rho_L A_f c_D \sqrt{\frac{2}{\rho_L} (P - P_{amb}) + 2g\Delta z_L} \quad (4.2)$$

dove P è la pressione iniziale nel serbatoio.

Questa equazione è d'interesse per questa trattazione perchè può essere utilizzata non solo per i liquidi incompressibili, ma anche per i flussi di non equilibrio⁸ di quei liquidi che, come il GPL, sono mantenuti nel contenitore al di sopra del loro punto di bolla atmosferico.

Inoltre il coefficiente di efflusso c_D per moto pienamente turbolento ($Re > 30000$) attraverso un orifizio a spigolo vivo assume valori compresi tra 0.6 e 0.64; il valore consigliato in letteratura è 0.61 (cfr. [61] e [65]). In situazioni in cui il valore del coefficiente di efflusso non è noto o calcolabile in modo affidabile è opportuno scegliere un valore unitario per massimizzare la portata scaricata e quindi ottenere risultati conservativi.

- **Efflusso monofase gassoso:** in questo caso per risolvere l'integrale in eq.4.1 è necessario definire il legame tra P e ρ nella trasformazione termodinamica che il fluido compie durante il processo di scarico. Assumendo che tale legame sia quello di una trasformazione isoentropica⁹, $P/\rho^\gamma = \text{cost}$, è possibile ottenere semplici relazioni per l'efflusso attraverso un orifizio o un ugello. La portata gassosa scaricata può quindi essere valutata come [66]:

$$\dot{m}_{\text{disch}} = A_f c_D \sqrt{P \rho_v \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (4.3)$$

dove P è la pressione nel serbatoio, e γ il coefficiente adiabatico del gas. La portata di gas scaricata attraverso un orifizio aumenta al diminuire della pressione a valle dell'apertura fino a raggiungere un valore massimo in corrispondenza di un valore critico di P (condizioni soniche). In generale si ha flusso sonico (portata massima) quando:

$$\frac{P_{\text{amb}}}{P} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx 0,5 - 0,6$$

⁸Per la definizione di flusso di non equilibrio cfr. Appendice pag. 227

⁹Una tale approssimazione è ragionevole in quanto la trasformazione che subisce il gas fuoriuscendo dal recipiente è talmente rapida da poter essere assunta adiabatica, e una trasformazione adiabatica reversibile è anche isoentropica; della non isoentropicità della trasformazione tiene conto il coefficiente di efflusso, c_D .

L'equazione 4.3 presuppone quindi **flusso sonico** (Mach=1) e non può essere applicata se la pressione nel contenitore è meno di 2 bar [61]. Per un gas perfetto infatti una pressione interna di circa 2 bar è sufficiente per raggiungere le condizioni di scarico sonico all'atmosfera, mentre per un gas reale servono circa 2.4 bar. Per pressioni inferiori si può invece utilizzare il metodo adottato per il flusso di liquido incomprimibile (eq.4.2).

Per il GPL la costante isoentropica¹⁰ vale $\gamma = 1.13$ [67]. Pertanto il rapporto critico tra le pressioni è $P_{amb}/P_{serbatoio} = 0,57845$.

Per il coefficiente di efflusso valgono le stesse considerazioni fatte per il caso di scarico di fluidi incomprimibili: $0.61 < c_D < 1$. In letteratura si raccomanda $c_D = 0.85$ [61].

- **Efflusso bifase (flusso d'equilibrio)**¹¹: come già si è osservato in precedenza, se il GPL liquido viene rilasciato a causa di un rottura o un foro in un serbatoio, il flash, avendo dei tempi finiti per realizzarsi, avviene all'esterno; in questo caso per calcolare la portata rilasciata si può usare la (eq.4.2). Tuttavia se il rilascio è dovuto alla frattura in una tubazione, può accadere che il liquido abbia dei tempi di residenza prima dello scarico sufficienti affinché il flash si manifesti all'interno. Tipicamente ciò avviene se la lunghezza del tubo di scarico è $L \geq 10\text{cm}$ [61]. In questo caso la portata scaricata è una miscela bifase liquido-vapore.

Il calcolo della portata bifase scaricata attraverso un orifizio o una tubazione presenta però un elevato grado di complessità correlato con il grande numero di fenomeni coinvolti (trasferimento di energia, materia e quantità di moto tra le fasi, raggiungimento o meno dell'equilibrio termodinamico tra le fasi, presenza di fenomeni di attrito) e con la difficoltà di elaborare modelli matematici in grado di descrivere ciò che accade in maniera sufficientemente precisa ed essere, al contempo, facilmente gestibili. In letteratura esistono diversi schemi di calcolo che forniscono la portata specifica massima, in corrispondenza cioè delle condizioni

¹⁰Per un gas perfetto il coefficiente γ è pari a 1.67 per gas monoatomici, 1.4 per biatomici e 1.32 per triatomici. Per gas reali l'esponente che mette in relazione pressione e densità in una trasformazione isoentropica è diverso da tale rapporto e varia solitamente tra 1.1 e 1.8.

$$\gamma = \frac{v}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_s \xrightarrow{\text{gas perfetto}} \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

¹¹il flash avviene internamente

di efflusso critiche. Tali schemi di calcolo non vengono qui esposti, dal momento che il proposito di questa trattazione è quella di ottenere degli strumenti di analisi per quantificare il rilascio dell'incidente di Viareggio, che può essere descritto dalla (eq.4.2) e dalla (eq.4.3). In quel caso infatti il flash è sicuramente avvenuto all'esterno.

Evaporazione flash: calcolo della frazione di flash

Un altro importante termine di sorgente da valutare nel caso di composti che, come il GPL, danno flash è la frazione di composto che evapora rapidamente e si disperde di conseguenza in atmosfera, detta **frazione di flash**. In Fig. ?? è indicata una ipotetica reazione di flash del propano.

La frazione di flash può essere calcolata in questo modo [61][68]:

$$x_V = \frac{c_{pL}(T - T_{eb})}{\Delta H_{ev}} \quad (4.4)$$

dove T è la temperatura del getto di liquido rilasciato (ovvero quella del serbatoio), c_{pL} è il calore specifico del liquido $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$ e ΔH_{ev} è il calore latente di evaporazione $[\text{kJ/kg}]$.

Tuttavia, come già si è detto, la generazione di vapore non è limitata al solo flash adiabatico. Un approccio largamente usato (Kletz, 1977 [60]) prevede di porre pari a x_V la frazione di liquido trascinato in aria sotto forma di goccioline (aerosol), che successivamente evaporano; ne segue che se la frazione di flash è del 50%, secondo questa approssimazione, tutto il liquido si trasforma in vapore e in spray.

Getto bifase (Jet)



Figura 4.6: Rilascio a spruzzo

La formazione di aerosol, oltre ai fenomeni di rapida evaporazione descritti precedentemente (flash), può anche avvenire a causa dello scarico di un liquido in pressione

attraverso una piccola apertura. Una situazione tipica è quella della perdita da una flangia di una tubazione in cui è presente liquido in pressione. Lo spruzzo di liquido può quindi generare un gran numero di goccioline che si frantumano minutamente dando origine a un aerosol. Quindi le goccioline di liquido si possono formare non solo termicamente, come accade a causa della violenza del flash, ma anche meccanicamente: è lo sforzo di taglio tra il getto di liquido scaricato ad alta velocità e l'aria circostante a nebulizzare il liquido stesso. Quindi questo meccanismo è attivo anche per liquidi diversi dal GPL, ovvero liquidi non surriscaldati.

Evaporazione da pozza

La frazione di GPL liquido che non viene trascinato dal flash sotto forma di aerosol va a costituire una pozza di liquido in condizioni di equilibrio (e.g. propano puro a -42°C a pressione atmosferica).

In generale per le pozze di composti ad una temperatura pari alla temperatura di ebollizione normale, la portata di evaporazione è determinata dal trasporto di calore dall'ambiente circostante alla pozza di liquido, in quanto essendo le portate in gioco elevate il trasporto materiale non associato al trasporto di calore non è solitamente significativo, almeno nelle prime fasi dell'evaporazione. La portata evaporante si calcola in questo caso sulla base della potenza termica trasmessa al fluido utilizzando un bilancio di energia sulla pozza:

$$m_L c_{pL} \frac{dT}{dt} = H - \dot{m}_{\text{evap}} \Delta H_{\text{evap}}$$

dove H è la potenza termica trasmessa alla pozza dall'ambiente circostante (convezione e conduzione dall'aria, conduzione dal terreno, irraggiamento solare o da un incendio vicino, ecc.) e $\dot{m}_{\text{evap}}$ la portata evaporante. Nel primo periodo dopo il rilascio il termine dominante è solitamente il trasporto di calore per conduzione dal terreno sottostante. Man mano che il tempo passa il terreno si raffredda sempre più in profondità, lo scambio termico con la pozza di liquido diminuisce e gli altri contributi possono diventare dominanti.

4.3 Gli incendi

In condizioni di pressione atmosferica, temperatura ambiente e di una normale energia di innesco, i limiti di infiammabilità del GPL possono essere rappresentati come in Figura 4.7, conformemente a quanto ricavato a pag. 39 e riportato in Tabella 1.11.

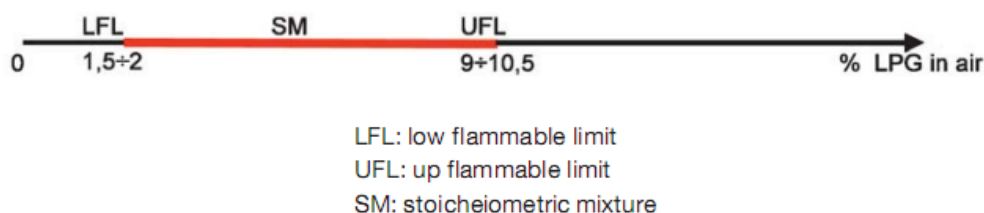


Figura 4.7: Campo d'infiammabilità del GPL

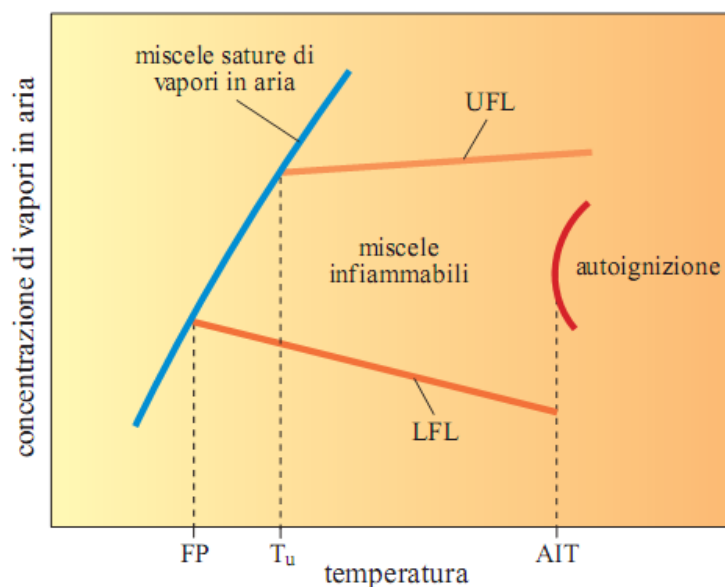


Figura 4.8: Effetto della temperatura sul Li(LFL) e sul Ls(UFL) [59]. In generale i valori dei limiti d'infiammabilità dipendono, come spiegato al Capitolo 1 a pag.18, dai valori di pressione e di temperatura e tendono ad allontanarsi (l'intervallo diventa più ampio) all'aumentare della temperatura ambiente, come è evidenziato qui sopra. Si nota poi che oltre una certa temperatura (AIT, Auto Ignition Temperature) si ha innesco immediato della reazione di combustione.

Gli incendi¹² di interesse negli impianti di processo, ma anche ad esempio nei carri-cisterna, si possono suddividere nelle seguenti tipologie:

¹²La **minima energia** necessaria per innescare un l'incendio (MIE, Minimum Ignition Energy),

- **Jet fire:** getto incendiato (detto anche dardo di fuoco) di gas infiammabile. Si può verificare in caso di fuoriuscita di gas pressurizzato come il GPL (ad esempio da un piccolo foro o da una valvola di sicurezza), ma anche in caso di incendio di una miscela gassosa all'interno di una tubazione.
- **Pool fire:** incendio di una pozza di liquido infiammabile. Si può verificare in caso di una perdita di liquido da un serbatoio o da una tubazione, se la pozza di liquido trova un innesco. Casi tipici sono gli incendi di liquidi infiammabili all'interno dei bacini di contenimento di serbatoi o l'incendio di liquidi all'interno dei serbatoi stessi.
- **Flash fire:** incendio di una nube di gas o vapori infiammabili. Si può verificare in caso di fuoriuscita di prodotto infiammabile gassoso o allo stato vapore da un serbatoio o da una tubazione. Si può anche verificare in caso di formazione di una pozza di liquido infiammabile che non trovi un innesco: il liquido vaporizza dalla pozza e forma una nube infiammabile.
- **Fireball:** palla di fuoco, dovuta all'innesco di una massa di vapori infiammabili rilasciata in modo pressoché istantaneo a causa dell'espansione di gas liquefatti (e.g. GPL, butano, propano). Essa è dovuta tipicamente al cedimento del recipiente, con rapido flash del liquido che vaporizza e trascina gran parte del liquido rimanente come aerosol.

Negli impianti di processo, l'origine di un incendio è generalmente la perdita di fluido proveniente dall'impianto. La perdita può essere grave, come accade nel caso di una rottura di recipienti, tubazioni e pompe, ecc., o lieve, come accade nel caso di perdite da flange, tenute, bocchelli, ecc. Tra le possibili cause di fuoriuscita vi sono il sovrariempimento di recipienti (ad esempio per errori operativi o guasti della strumentazione), la rottura di apparecchiature ausiliarie, come le pompe, il tranciamento accidentale di tubazioni, la presenza di un incendio nelle vicinanze (effetto domino), ecc.

La situazione incidentale che si può presentare successivamente alla fuoriuscita di una sostanza infiammabile come il GPL può essere assai diversa, dipendentemente dalla

diminuisce all'aumentare della temperatura e la si ritrova nelle normali e naturali attività dell'uomo; basta una piccola fiamma, una scintilla, un'onda di compressione, un campo elettromagnetico per superare, ad esempio, gli 0,23 mJ richiesti dal propano per accendersi [28]. La velocità del fronte di fiamma dipende dalla composizione della miscela gassosa combustibile-comburente, ossia dalla percentuale in aria di prodotto; più ci si avvicina alla concentrazione stechiometrica, relativa alla reazione di combustione, minore è l'energia minima necessaria per l'innesco e maggiore è la velocità del fronte di fiamma. Funzione di tali parametri, è anche l'ampiezza del campo di infiammabilità.

fase in cui avviene il rilascio (gas, liquido, ecc.) e dalla presenza di fonti di innesco¹³ che posso causarne l'accensione immediata o ritardata, come mostra la Figura 4.9, che si riferisce proprio alla fuoriuscita di un generico liquido pressurizzato.

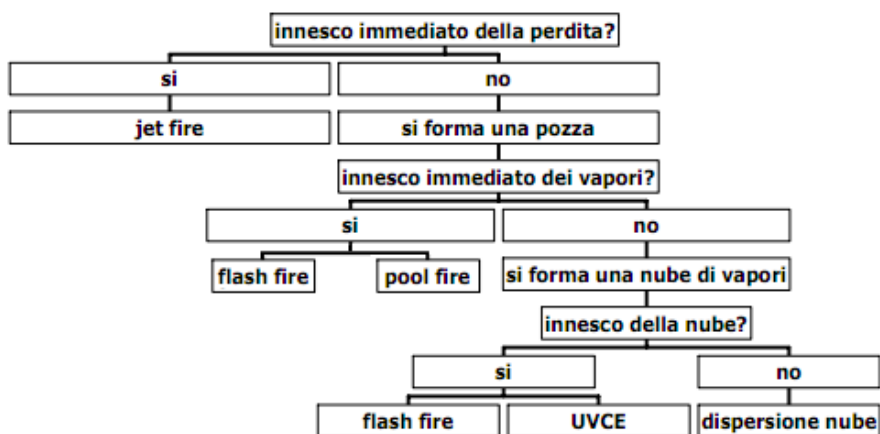


Figura 4.9: Possibili scenari d'incendio. Se la perdita trova immediatamente una fonte di innesco origina un jet fire, che ha generalmente effetti modesti, tranne se diretto contro un'altra apparecchiatura, nel qual caso sono possibili effetti domino. Se invece la perdita è liquida e forma una pozza, il liquido, se innescato, può bruciare avvolgendo cose e persone, causando danni gravi per irraggiamento: è pure possibile il cedimento di apparecchiature vicine, se non vengono adeguatamente raffreddate. Infine, se la perdita non trova rapidamente un innesco, si forma una nube di vapori infiammabili: essa può diventare molto estesa e spostarsi anche notevolmente prima di incontrare un innesco dando luogo ad un flash fire od una UVCE. Un flash fire è di rapida durata e causa generalmente danni solo alle parti più esposte dell'impianto (ad esempio i cavi elettrici) senza distruggere le apparecchiature. Può essere tuttavia letale non solo per effetto della radiazione termica ma anche perché la nube, bruciando molto rapidamente, consuma gran parte dell'ossigeno nella zona.

4.3.1 Incendi da pozza (pool fire)

Un incendio da pozza (Fig. 4.10) può essere definito come una fiamma diffusiva turbolenta sopra la superficie orizzontale di un generico combustibile liquido che evapora

¹³Le fonti di innesco più frequenti negli impianti dell'industria di processo sono attrito, surriscaldamento e superfici calde (25%), fumi caldi e bruciatori (25%) ed elettriche (23%); meno frequenti le scintille (8%) le operazioni di taglio e saldatura (4%), fulmini ed elettricità statica (2%); va poi ricordata la possibilità di atti intenzionali (3%).

abbastanza lentamente da avere una quantità di moto iniziale sostanzialmente nulla¹⁴. Una caratteristica fondamentale di questo tipo di incendi è la presenza di un feedback tra la fiamma e il combustibile in quanto, in misura più o meno importante, il trasferimento di calore dalla fiamma alla pozza di liquido influenza (e al limite controlla) la velocità di evaporazione del combustibile e quindi in ultima analisi le dimensioni della fiamma. I parametri importanti negli incendi da pozza sono:

- la velocità con cui brucia il liquido M_b ;
- la dimensione della pozza (diametro D);
- l'altezza delle fiamme (H);
- l'inclinazione e lo spostamento delle fiamme per effetto del vento¹⁵.

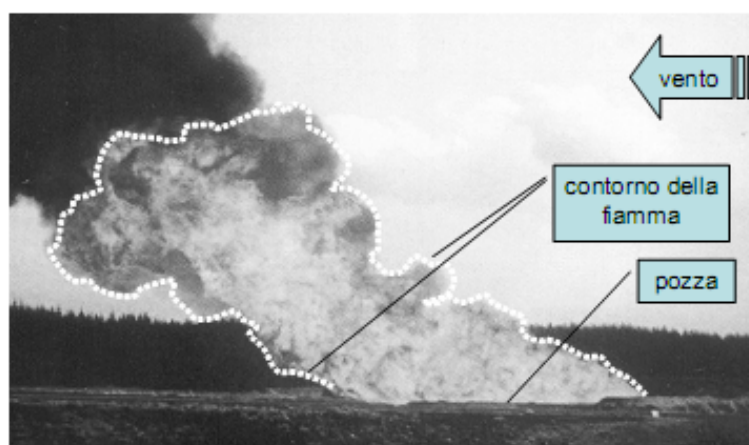


Figura 4.10: Pool-fire da una pozza di combustibile liquido (modificata da AichE [76])

Nei grossi incendi da pozza il liquido brucia con una velocità costante, caratteristica del combustibile, che per gli idrocarburi assume tipicamente valori compresi tra circa 0,05 $\text{kg/m}^2\text{s}$ per la benzina e circa 0,12 $\text{kg/m}^2\text{s}$ per il GPL.

La dimensione della pozza in molti casi pratici è fissata dalla presenza di barriere fisiche che ostacolano lo spandersi del liquido, come bacini di contenimento, aree di drenaggio, parete del serbatoio, etc....

¹⁴Per quanto riguarda il GPL, come si è già detto, al momento del rilascio in ambiente subisce un violento flash, che trascina una gran quantità di liquido sotto forma di aerosol; la frazione di liquido residua che va a formare la pozza evapora molto lentamente.

¹⁵La velocità del vento ha un'importanza non trascurabile sulla lunghezza e inclinazione (tilt) della fiamma, nonché sul possibile trascinamento della fiamma nella direzione del vento (drag)

In caso di fuoriuscita continua¹⁶ di liquido su una superficie non confinata la pozza raggiunge la sua dimensione massima quando il quantitativo di combustibile che evapora e brucia eguaglia quello che arriva nella pozza. I modelli di calcolo disponibili trascurano l'assorbimento del liquido da parte del terreno: tale ipotesi è corretta per pavimentazioni in cemento, ma risulta fortemente conservativa se lo sversamento avviene su un terreno. Si assume inoltre che la pozza sia circolare, utilizzando un diametro equivalente per i bacini di contenimento, che sono rettangolari o quadrati, calcolato come il diametro della pozza circolare che presenta la stessa superficie del bacino.

L'altezza delle fiamme è generalmente pari a 2 a 3 volte il diametro della pozza e si può valutare con numerose correlazioni, tra cui la più nota è quella di Thomas:

$$\frac{H}{D} = 42 \left[\frac{M_b}{\rho_a \sqrt{g \cdot D}} \right]^{0,61} \quad (4.5)$$

dove:

H = altezza visibile della fiamma (m);

D = diametro equivalente della pozza (m);

M_b = velocità di combustione del liquido ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$);

ρ_a = densità dell'aria ambiente (tipicamente $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$);

g = accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$).

Inoltre le fiamme possono essere inclinate per effetto del vento: tale effetto, detto 'tilt' (cfr. Figura 4.10 e 4.13) è spesso accompagnato da quello, detto 'drag', per cui la base dell'incendio risulta trascinata sottovento rispetto alla pozza. In molti casi pratici gli effetti di spostamento delle fiamme causati dal vento sono trascurabili e quelli di inclinazione delle fiamme sono presi in esame solo in presenza di strutture molto vicine.

Stima degli effetti da pool fire

Nel caso di un pool fire gli effetti sono collegati al calore radiante che colpisce il bersaglio, costituito da una persona o da una struttura. Come mostra la figura 4.11, tale radiazione

¹⁶Il rilascio del combustibile può essere schematizzato come istantaneo o continuo in funzione del valore della durata del rilascio, t_R , rispetto a un tempo caratteristico della combustione, t_C . Quest'ultimo può essere stimato come il rapporto tra una dimensione caratteristica dello scarico (pari per esempio alla radice cubica del volume di liquido combustibile rilasciato, V_L) e la velocità lineare di bruciamento, s_L in m/s. Vale:

$$\tau = \frac{t_R}{\sqrt[3]{V_L/s_L}} \begin{cases} > 0,002 & \text{continuo} \\ < 0,002 & \text{istantaneo} \end{cases}$$

termica si può valutare dalla conoscenza della superficie che irraggia (involucro della fiamma), noto il calore che essa emette, tenendo conto del cosiddetto 'fattore di vista' geometrico, che considera gli effetti legati ad angolo e distanza di impatto, e del calore trattenuto dall'atmosfera, mediante la trasmittività atmosferica.

Un approccio diverso è quello di valutare il calore totale rilasciato nella combustione, stabilire quale frazione di tale calore venga irraggiato (tipicamente tra il 20 e il 35%, si veda Tabella 4.2) e pervenire alla radiazione incidente tramite un fattore di vista 'puntuale', assumendo che il calore sia irraggiato da un unico punto, correggendo sempre il valore per tenere conto della trasmittività atmosferica.

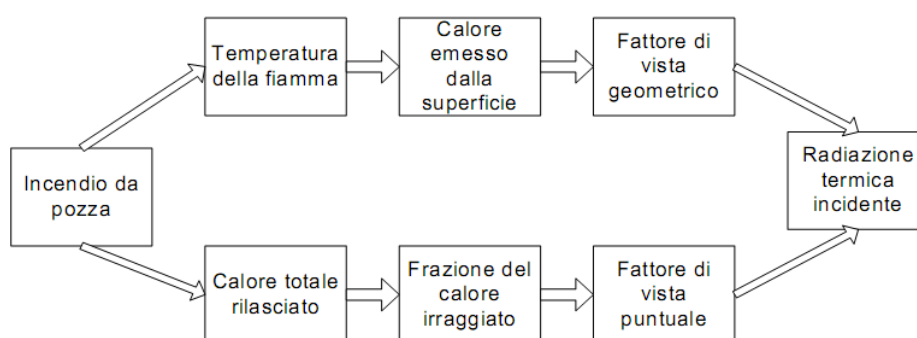


Figura 4.11: Due differenti approcci per stimare la radiazione termica prodotta da un pool fire.

Nel primo approccio l'incertezza maggiore è rappresentata dalla stima della temperatura delle fiamme, che compare alla quarta potenza nell'espressione del calore irraggiato, nel secondo approccio dalla stima della frazione di calore irraggiato (detta anche *efficienza d'irraggiamento*)¹⁷.

Utilizzando l'approccio legato alla stima del calore totale (approccio 2 della fiamma puntiforme) e della frazione irraggiata (efficienza d'irraggiamento), le equazioni per valutare la radiazione incidente sul bersaglio, nell'ipotesi che esso assorba tutta l'energia che gli

¹⁷Se l'intera portata evaporante di combustibile bruciasse con una quantità stechiometrica di aria e tutta l'energia liberata dalla combustione venisse irraggiata dalla fiamma, la potenza emessa sarebbe facilmente calcolata, moltiplicando la portata di combustibile evaporante per il suo calore di combustione. Ovviamente ciò non avviene nella realtà, sia per la parziale combustione del combustibile dovuta alla natura diffusiva della fiamma, sia perché parte dell'energia di combustione viene dispersa nel pennacchio di gas caldi, sia per il parziale oscuramento della fiamma stessa a opera del particolato. Di questo si può tener conto in modo efficace con un fattore di efficienza, F_{rad} , che dia conto della frazione di energia disponibile che viene effettivamente irraggiata.

arriva, senza rifletterne affatto (ossia che esso si comporti come un corpo nero), sono:

$$Q = M_b \cdot E_c \cdot A_p \quad (4.6)$$

$$Q_R = F_{rad} \cdot Q \quad (4.7)$$

$$Q_{target} = Q_R \cdot F_p \cdot \tau_A \quad (4.8)$$

dove

Q = calore totale emesso dalla pozza che brucia (kW);

M_b = velocità di combustione del combustibile nella pozza ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$);

E_c = calore di combustione del combustibile (kJ/kg);

A_p = superficie della pozza (m^2);

Q_R = calore irraggiato dalla pozza (kW);

F_{rad} = frazione del calore totale che viene irraggiata (o efficienza d'irraggiamento);

Q_{target} = flusso di calore irraggiato sul bersaglio (kW/m^2);

F_p = fattore di vista puntuale ($1/\text{m}^2$);

τ_A = trasmissività atmosferica (= frazione di radiazione emessa che non viene assorbita dall'atmosfera). Per la stima dell'irraggiamento della fiamma su di un dato recettore bisogna infatti tener conto anche del fatto che una frazione dell'energia irraggiata viene assorbita dall'umidità e dalla CO_2 presente nell'atmosfera.

Sostanza	Diametro pozza [m]	Efficienza F_{rad} [%]
metanolo	0,074	16,2
	0,152	16,5
	1,22	17,7
metano	0,305	21
	0,76	23
	1,53	15-24
	3,05	24-34
	6,10	20-27
butano	0,305	19,9
	0,457	20,5
	0,76	26,9
benzina	1,22	30-40
	1,53	16-27
	3,05	13-14
benzene	0,076	35
	0,457	34,5
	0,76	35
	1,22	36

Tabella 4.2: Alcuni esempi d'efficienza d'irraggiamento F_{rad} .

Il fattore di vista puntuale si calcola come:

$$F_p = \frac{\cos \theta}{4\pi \cdot r^2} \quad (4.9)$$

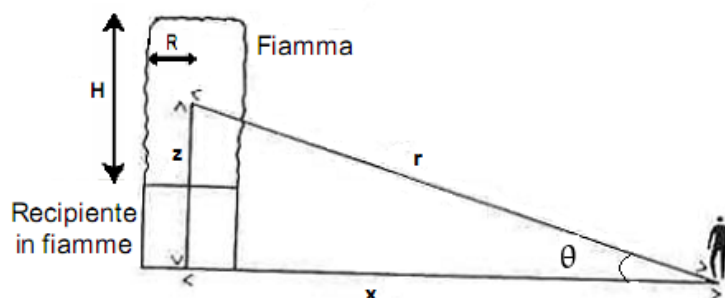


Figura 4.12: Modello di fiamma puntiforme (nel baricentro).

dove

r = raggio, ossia distanza tra fiamma e bersaglio, misurata lungo la diagonale (m);

θ = angolo formato dal raggio con l'orizzontale.

La trasmittività atmosferica τ_A , che rappresenta la frazione dell'energia ricevuta che viene trasmessa dall'atmosfera verso il bersaglio, si può valutare dalla:

$$\tau_A = 2,02(p_w \cdot d)^{-0,09} \quad (4.10)$$

dove

p_w = pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria (Pa)

d = distanza tra bordo della fiamma e bersaglio.

Il valore della pressione parziale del vapor d'acqua si può valutare nota la temperatura e l'umidità relativa dell'aria. Quest'ultima è infatti definita come rapporto tra la pressione parziale del vapore d'acqua, p_w , e la pressione di saturazione del vapor d'acqua alla temperatura considerata, p_s ¹⁸.

La trasmittività atmosferica τ è piuttosto importante: infatti, ad una distanza di 100 m dal 20 al 40% del flusso termico può essere assorbito o deviato dall'atmosfera ($\rightarrow \tau_A = 60 - 80\%$).

¹⁸L'equazione di Antoine della tensione di vapore dell'acqua vale:

$$\ln(p_s) = 18,3036 - \frac{3816,44}{T - 46,13}$$

dove p_s = tensione di vapore (mm Hg); T = temperatura (K).

E' anche possibile basarsi sul valore del flusso termico misurato in incendi da pozza di propano, che vale generalmente $250 \text{ [kW/m}^2\text{]}^{19}$.

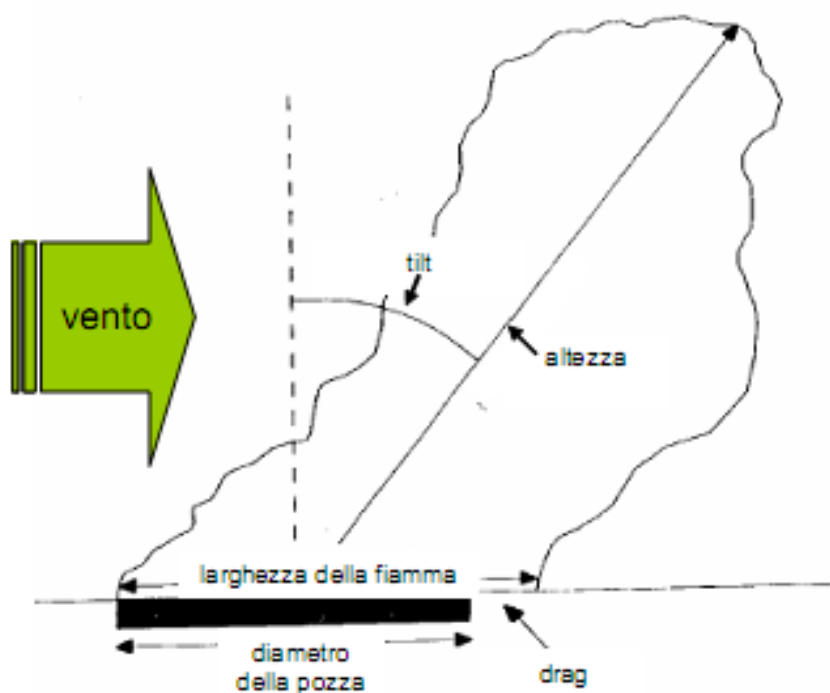


Figura 4.13: Parametri geometrici della fiamma.

4.3.2 Fiamme da getti turbolenti (jet fire)

In generale una fiamma da getto turbolento è una fiamma diffusiva risultante dalla combustione di un combustibile liquido o gassoso rilasciato in modo continuo con una quantità di moto in una ben definita direzione non trascurabile.

La principale differenza tra questo tipo di incendi e gli incendi da pozza è che non esiste alcuna retroazione dalla fiamma al combustibile che determina la velocità di bruciamento e quindi la potenza emessa dalla fiamma e la sua geometria. Nel caso di getti turbolenti, la velocità di bruciamento è pari alla portata di combustibile scaricato e la geometria della fiamma è interamente determinata dalle caratteristiche fluidodinamiche del getto.

¹⁹i valori dei flussi termici si riducono a $20\text{-}60 \text{ kW/m}^2$ in presenza di dense cortine di fumo, come accade nell'incendio di combustibili liquidi che vaporizzano a velocità non elevata, come il kerosene.

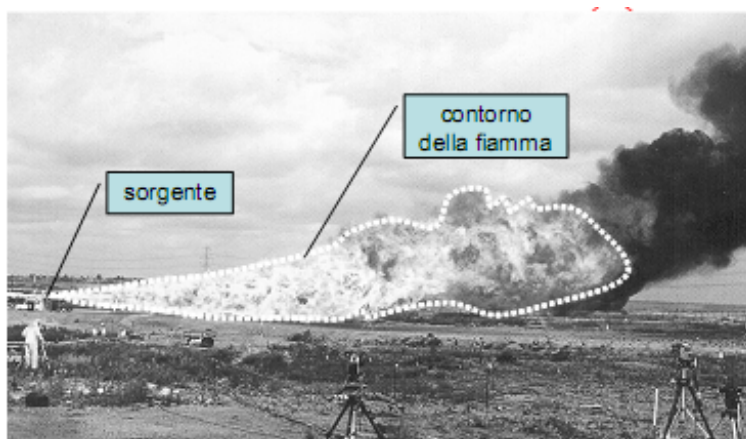


Figura 4.14: Jet-fire di un getto di propano liquefatto (modificata da AichE [76])

Si noti che il comportamento della fiamma diffusiva dipende dalla velocità con cui esce il combustibile, attraverso il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

dove

Re = numero di Reynolds;

v = velocità d'efflusso fluido (m/s);

D = diametro del getto (m);

ρ = densità del fluido (kg/m^3);

μ = viscosità dinamica del fluido (Pa·s).

L'effetto della velocità di scarico del getto sulla geometria della fiamma al variare della velocità di scarico è rappresentato nella Figura 4.15.

Si nota che a basse velocità di scarico la fiamma risulta laminare. In caso di flusso in regime laminare ($Re < 2100$) i filetti fluidi sono paralleli tra loro e la lunghezza della fiamma è proporzionale alla velocità: il valore massimo viene raggiunto per $Re = 2100$. Segue una fase di transizione, in cui aumenta man mano la turbolenza, a partire dalla parte della fiamma più lontana dal foro: la fiamma si allarga, ma la sua lunghezza resta pressoché costante. Quando il regime diviene turbolento, per $Re > 10000$ (propano), i filetti fluidi non sono più regolari e si ha la formazione di vortici turbolenti: la fiamma è completamente turbolenta, la sua lunghezza non varia e c'è una zona, in prossimità del foro di uscita, in cui non c'è fiamma (la fiamma si 'solleva' rispetto al punto di uscita). Quando la velocità di fuoriuscita del combustibile è troppo alta, si raggiunge il punto di

estinzione (il cosiddetto 'blow-off') e la fiamma si spegne, mentre il combustibile continua a fuoriuscire. Se il gas si incendia mentre sta percorrendo una tubazione, di norma, la velocità di avanzamento del gas è superiore a quella di combustione, per cui non si ha ritorno di fiamma: la fiamma può iniziare a percorrere la tubazione a ritroso solo se la velocità di avanzamento del gas è bassa.

Le fiamme diffusive in regime laminare hanno temperature intorno a 1200°C, inferiori rispetto a quelle delle fiamme diffusive in regime turbolento (circa 1600°C).

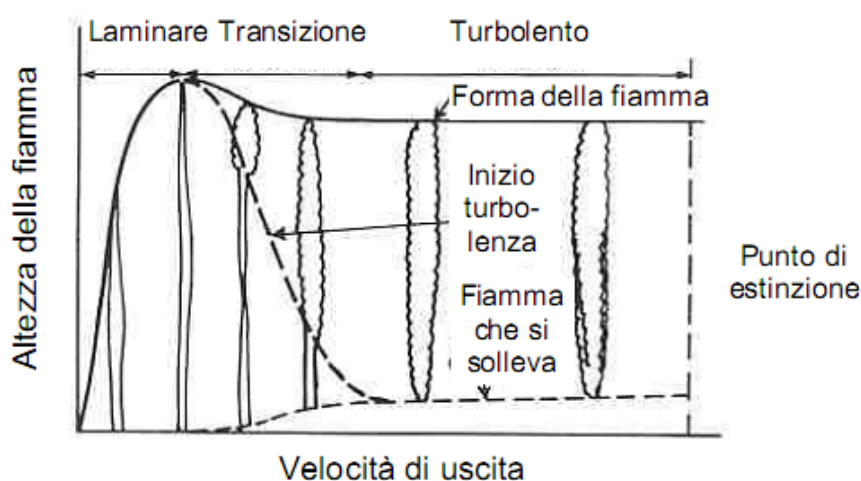


Figura 4.15: Andamento qualitativo dell'altezza di una fiamma diffusiva verticale in aria calma al variare della velocità di scarico.

Una differenza sostanziale tra i pool fire e i jet fire è che nei primi lo scambio termico convettivo in seno alla fiamma è dominato dalla convezione naturale (velocità dei gas di combustibile praticamente trascurabile), nei secondi dalla convezione forzata. Pertanto, al fine di differenziare i due tipi di incendio in termini di geometria della fiamma, è opportuno stabilire l'importanza relativa della convezione forzata rispetto alla convezione naturale. Per fare ciò, si introducono altri due parametri adimensionali oltre al Reynolds. Uno è il numero di Froude, rapporto tra forze d'inerzia e quelle gravitazionali di galleggiamento (forza peso):

$$Fr = \frac{u^2}{g \cdot D}$$

dove

u = velocità del gas (m/s);

D = diametro del getto (m);

g = accelerazione gravitazionale (9,81 m/s²).

Quanto più la convezione forzata diviene importante, tanto maggiori sono le forze d'inerzia ($Fr \geq 1$); vice versa la forza gravitazionale è dominante se la convezione naturale governa la formazione del jet fire ($Fr \rightarrow 0$).

Generalmente i getti turbolenti provenienti da tubi o fori sono caratterizzati da un numero di Froude alto a causa dell'elevata velocità di fuoriuscita del combustibile.

Il secondo parametro chiamato $\dot{Q}^*$ è il flusso termico adimensionale generato dalla combustione del getto di combustibile scaricato ed è definito come segue:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c p_{\infty} T_{\infty} \sqrt{g D D^2}}$$

dove

$\dot{Q}$ = potenza termica generata dalla combustione del getto (W);

ρ_{∞} = densità dell'aria inglobata nel getto incendiato (kg/m^3);

$c p_{\infty}$ = calore specifico dell'aria inglobata nel getto incendiato (J/kgK);

T_{∞} = temperatura dell'aria inglobata nel getto incendiato (K).

Questo numero adimensionale è stato introdotto nel 1970 da Zukoski e non è altro che una funzione della radice quadrata del numero di Froude.

Pertanto le caratteristiche geometriche dei diversi tipi di fiamma a diffusione possono essere classificate in funzione di Fr e $\dot{Q}^*$, come mostrato nella Figura 4.16 per il rapporto lunghezza della fiamma (l) sul diametro dell'orifizio di scarico (D).

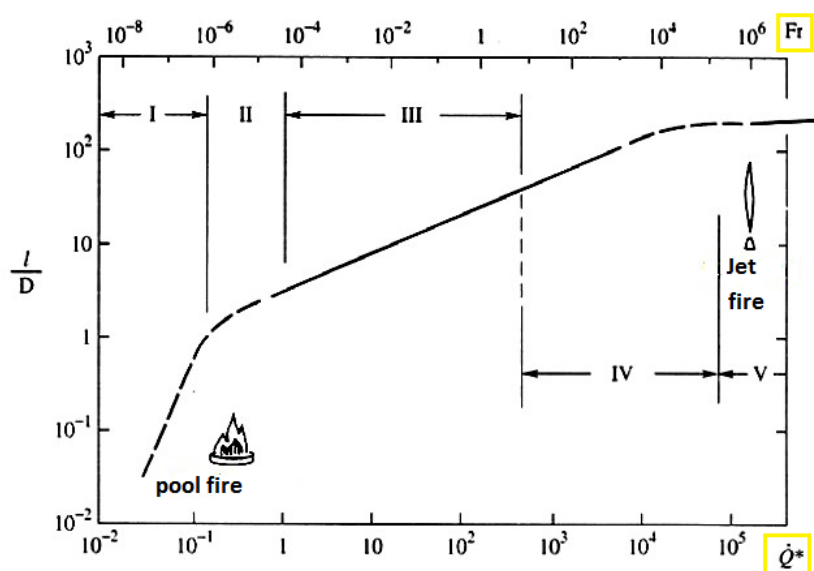


Figura 4.16: Classificazione delle fiamme in funzione del numero di Froude e di Zukoski (modificata da INERIS [78])

Le regioni I e II in Figura 4.16 corrispondono a fiamme a diffusione turbolente dominate dalla convezione naturale, come tipicamente avviene per gli incendi di pozze di liquido o di materiali solidi. Viceversa, la regione V caratterizzata da alti numeri di Froude corrisponde a jet fire pienamente turbolenti.

La definizione della geometria dei jet fire incontra problemi analoghi a quella dei pool fire. Inoltre, in questo caso la traiettoria della **fiamma** è sempre, in modo più o meno accentuato, **curvilinea**, in quanto risulta dal bilancio delle azioni di:

- quantità di moto iniziale: spinge il getto nella direzione dello scarico;
- vento: piega il getto verso una direzione orizzontale;
- spinta di galleggiamento: tende a deviare il getto verso una direzione verticale.

La definizione di una lunghezza di fiamma è quindi soggetta ad alcune ambiguità, anche perché, come i pool fire, anche i jet fire sono fenomeni pulsanti e intrinsecamente non stazionari: le previsioni dei modelli sono sempre quantità mediate nel tempo.

I modelli di simulazione della geometria dei jet fire si possono dividere in due tipologie:

1. quelli che determinano solo la lunghezza della fiamma (e vengono utilizzati essenzialmente per l'applicazione successiva di un modello a emettitore puntiforme, assumendo che l'intera energia venga rilasciata dal centro della fiamma);
2. quelli che rappresentano la fiamma come un tronco di cono (e vengono utilizzati essenzialmente per l'applicazione successiva di un modello a emettitore superficiale).

Un modello molto utilizzato per le fiamme da getti turbolenti è quello di Brzustowski che si basa sull'assunzione che, per getti pienamente turbolenti, la massima distanza di impatto sia lungo l'asse del getto e che non ci sia più la fiamma nel punto in cui la concentrazione del combustibile diviene minore al limite inferiore d'infiammabilità. Utilizzando la teoria dei getti liberi turbolenti in atmosfera calma (si trascurano l'effetto del vento e della gravità sulla fiamma e non si fa distinzione tra getti orizzontali, verticali e inclinati), è possibile derivare una relazione per ottenere quindi una stima della lunghezza della fiamma (L). La zona di pericolo ha un'estensione pari a circa il doppio della lunghezza della fiamma. Questa è proporzionale al rapporto tra peso molecolare

del combustibile e dell'aria ed al diametro del jet e inversamente proporzionale al limite inferiore di infiammabilità:

$$\frac{L}{D_{jet}} = \frac{Y_F}{0,32} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \left[1 + \frac{M_a}{M_f} \left(\frac{1}{0,297 \cdot LFL} - 1 \right) \right] \quad (4.11)$$

dove

L = lunghezza della fiamma (m);

D_{jet} = diametro del getto o dell'orifizio (m);

LFL = concentrazione corrispondente al limite inferiore di infiammabilità (% vol.);

M_a = peso molecolare dell'aria (29 kg/kmol);

M_f = peso molecolare del combustibile (kg/kmol);

ρ_a = densità dell'aria (kg/m³);

ρ_f = densità del combustibile (kg/m³);

Y_F = frazione massica del combustibile nel getto.

Un approccio semplificato, valido per il GPL, assume che la fiamma sia di forma conica e consente di valutare le sue dimensioni e la distanza d'effetto. Lunghezza di un jet-fire di GPL:

$$L \approx 9,1 \sqrt{\dot{m}}$$

dove

$\dot{m}$ = portata rilasciata (kg/s).

Il raggio della fiamma (conica) all'estremità più lontana dall'origine (m) è dato dalla relazione:

$$R \approx 0,25L$$

La distanza laterale entro cui è attesa una mortalità superiore al 50% degli individui esposti può essere stimata con la relazione:

$$r \approx 1,9 t^{0,4} \dot{m}^{0,47} > R$$

dove

t = tempo d'esposizione.

Queste relazioni sono valide per portate di GPL comprese tra 1 e 3000 kg/s e tempi di esposizione compresi tra 10 e 300 s [65].

Stima degli effetti da jet fire

L'approccio alla modellizzazione dei jet fire è analogo a quello discusso precedentemente per i pool fire: determinata la geometria della fiamma, si può utilizzare un modello puntiforme o un modello a emettitore solido per stimare l'irraggiamento. Nel primo caso si determina il centro della fiamma dove si assume localizzato l'emettitore puntiforme, mentre nel secondo caso si prosegue con la stima dell'emissività superficiale e quindi del fattore di vista geometrico. In entrambi i casi si giunge quindi alla valutazione dell'irraggiamento su di un dato recettore, come mostrato in Fig. 4.17.

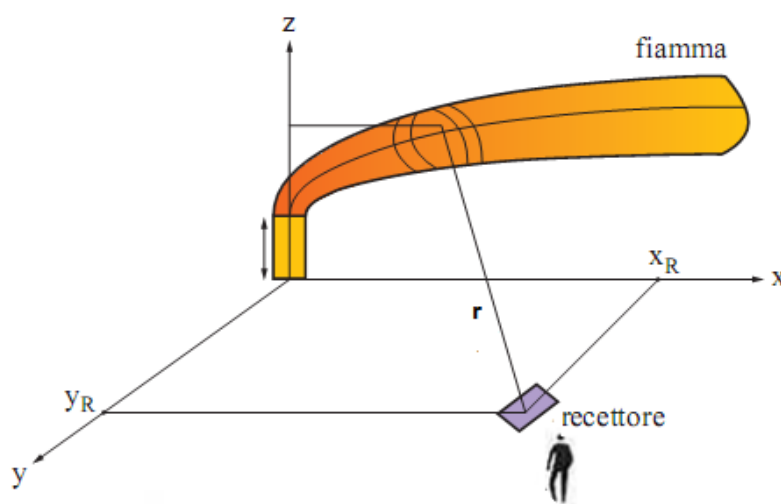


Figura 4.17: Schematizzazione di un jet fire.

Il problema del coinvolgimento diretto nella fiamma di apparecchiature vicine con un conseguente effetto domino è molto importante nel caso dei jet fire a causa della loro direzionalità, che può portare la fiamma anche a distanze considerevoli dal punto di emissione.

4.3.3 Palla di fuoco (fireball)

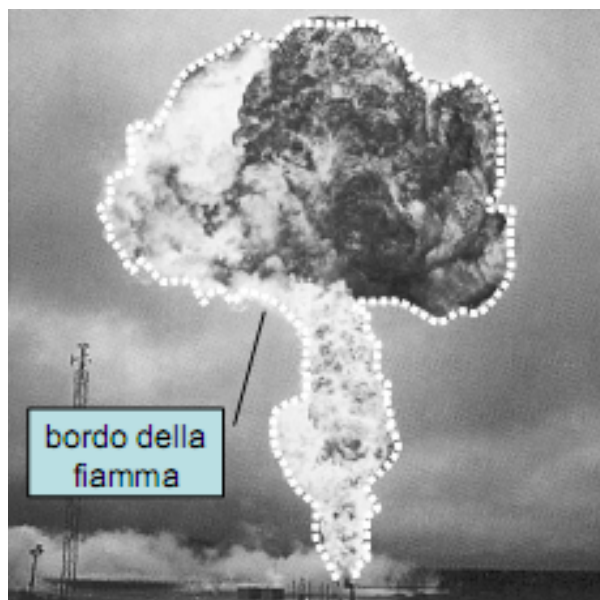


Figura 4.18: Fireball

Si ha formazione di una palla di fuoco, o fireball, quando, a seguito della rottura catastrofica di un recipiente in pressione viene rilasciato un liquido surriscaldato e/o un gas liquefatto (GPL), e questa perdita, che vaporizza immediatamente con forte aumento di volume (flash), trova una fonte di ignizione. Di fatto viene rilasciata in modo pressoché istantaneo una grossa quantità di combustibile. Molto spesso un fireball si verifica a seguito di un'esplosione di tipo BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) del recipiente: le caratteristiche di questo tipo di esplosione, che comporta un'onda di pressione e il lancio di frammenti saranno descritte più avanti. In generale la successiva formazione di un fireball ha conseguenze più gravi di quelle di un BLEVE. La tipica situazione in cui si sviluppa un fireball è il collasso di un serbatoio contenente proprio gas infiammabile liquefatto per compressione ed esposto a un incendio.

In questo caso, il riscaldamento del serbatoio provoca un aumento della temperatura della parete del serbatoio stesso, in modo più marcato nella zona a contatto con il vapore dove lo scambio termico con il fluido interno è meno efficace rispetto alla zona a contatto con il liquido. Le diverse temperature a cui si portano le pareti a contatto con il liquido e con il vapore generano tensioni che possono portare al cedimento del serbatoio, anche a pressioni inferiori a quella di apertura della valvola di sicurezza posta a protezione del serbatoio stesso. Il gas liquefatto si trova così istantaneamente

esposto alla pressione atmosferica in condizioni di elevato surriscaldamento ed evapora molto rapidamente. La presenza dell'incendio esterno fornisce l'innesco immediato necessario per la formazione di un fireball.

La modellizzazione degli effetti di una sfera di fuoco segue solitamente i seguenti passi sequenziali:

1. determinazione del diametro della sfera di fuoco;
2. determinazione della durata dell'incendio;
3. determinazione dell'innalzamento della sfera di fuoco;
4. calcolo dell'irraggiamento;
5. determinazione degli effetti sulle persone esposte.

Si tratta di un approccio del tutto analogo a quello seguito per i pool fire e per i jet fire: prima si determina la geometria della fiamma e poi si calcola l'irraggiamento su di un dato recettore.

La differenza più importante rispetto ai fenomeni termici legati ai pool fire e ai jet fire consiste nell'intensità e nella durata del fenomeno. Pur essendo ben noto che l'effetto dell'esposizione del corpo umano all'irraggiamento dipende sia dall'intensità dell'irraggiamento, sia dal tempo di esposizione, nel caso di fenomeni di lunga durata (quali i pool fire e i jet fire) solitamente si assumono, come discusso in precedenza, soglie di irraggiamento indipendenti dal tempo anche per gli effetti sulle persone. Questo approccio deriva dal fatto che l'irraggiamento necessario per fornire una dose legata a effetti letali o significativi non aumenta indefinitamente con il tempo ma tende a un valore asintotico all'aumentare del tempo; in particolare, per un tempo di esposizione superiore al minuto (che può essere considerato convenzionalmente dello stesso ordine di grandezza del tempo necessario a una persona per mettersi al riparo dall'irraggiamento) i valori di irraggiamento che causano certi effetti sono praticamente indipendenti dal tempo. In pratica però la durata di un fireball è spesso inferiore al minuto e quindi risulta necessario calcolare l'ammontare di irraggiamento correlato all'esposizione di durata finita.

Gli effetti termici del fireball sono stati studiati essenzialmente solo per idrocarburi. Sono disponibili diversi modelli, tutti di origine empirica, che forniscono la geometria del fireball e delle linee guida per la stima dell'irraggiamento sulla base della quantità M di

combustibile coinvolta nel fenomeno, espressa in kg, quale il seguente:

$$D_{\max} = 6,48M^{0,325} \quad (4.12)$$

$$t = 0,582M^{0,26} \quad (4.13)$$

$$H = 0,75D_{\max} \quad (4.14)$$

dove

$D_{\max}$ = diametro massimo del fireball (m);

M = massa di infiammabile coinvolta (kg);

t = durata del fireball (s);

H = altezza del centro del fireball rispetto al punto di rilascio (m).

La radiazione ricevuta da un bersaglio, in un tempo pari alla durata del fireball, è data da:

$$Q_{\text{target}} = E \cdot F_{21} \cdot \tau_A$$

dove

Q_{target} = radiazione ricevuta dal corpo nero bersaglio (kW/m²);

E = flusso termico emesso dalla superficie del fireball (kW/m²);

F_{21} = fattore di vista geometrico tra la sfera e la superficie bersaglio;

τ_A = trasmissività atmosferica.

Il flusso termico emesso dalla superficie del fireball, per il GPL, si può calcolare dalla:

$$E = \frac{F_{\text{rad}} \cdot M \cdot E_c}{\pi \cdot D_{\max}^2 \cdot t}$$

dove

F_{rad} = frazione di calore irraggiato (tipicamente 0,25-0,4);

E_c = calore di combustione (kJ/kg)

t = durata del fireball (s).

Tipici valori del flusso termico nel caso di fireball sono 200-350 kW/m², più alti dei pool fire, data l'assenza di fumo.

Il fattore di vista tra superficie del fireball ed il bersaglio si valuta dalla:

$$F_{21} = \frac{D_{\max}^2}{4 \cdot r^2}$$

dove

$D_{\max}$ = diametro massimo del fireball (m);

r = distanza tra il centro della sfera e il bersaglio (m).

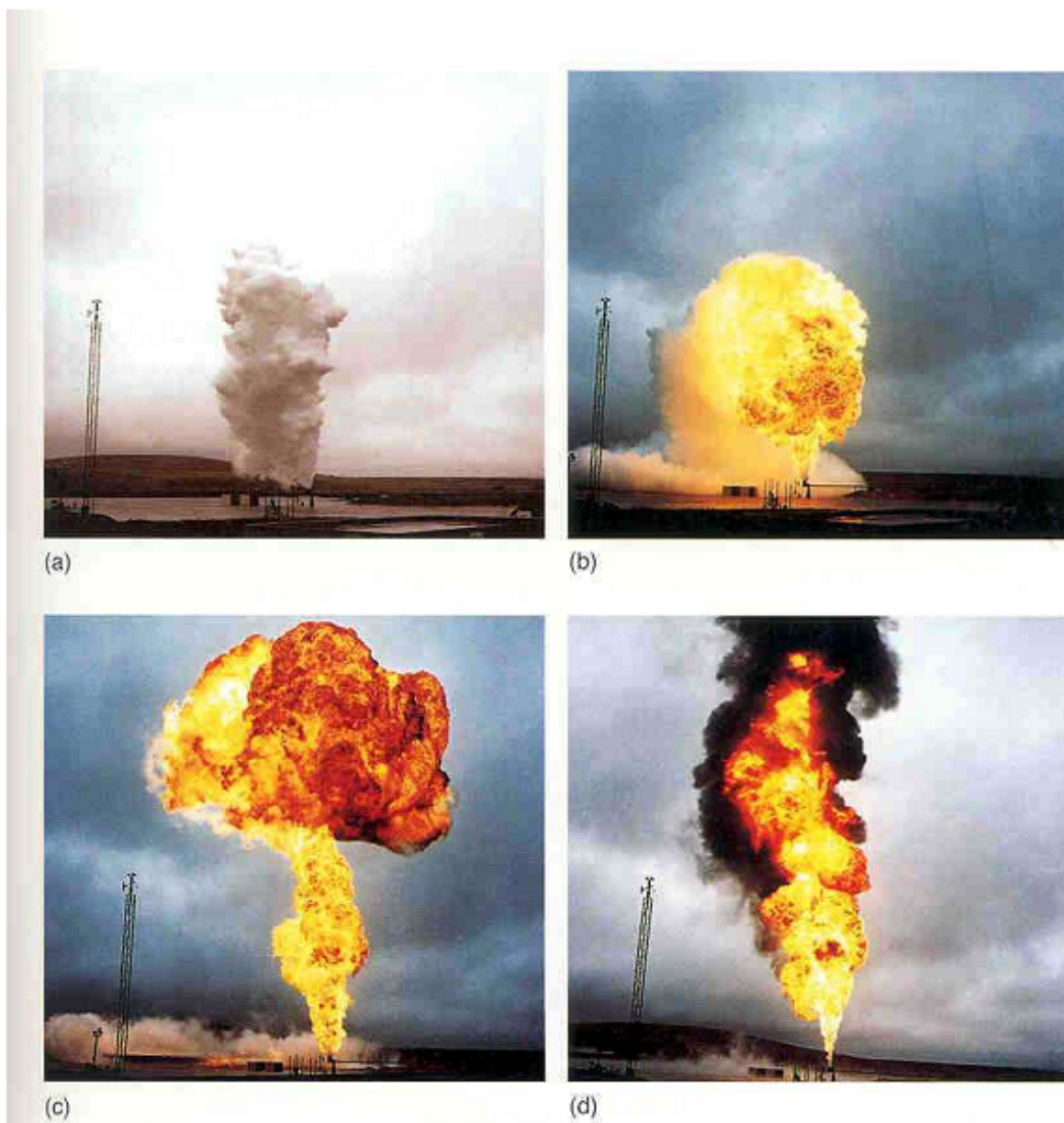


Figura 4.19: Sequenza di un fireball di propano (portata = 41 kg/s): a) 10 s prima dell'innesco; b) 1 s dopo l'innesco; c) 3 s dopo l'innesco; d) 8 s dopo l'innesco.

4.3.4 Incendi di nubi di vapore (flash fire)

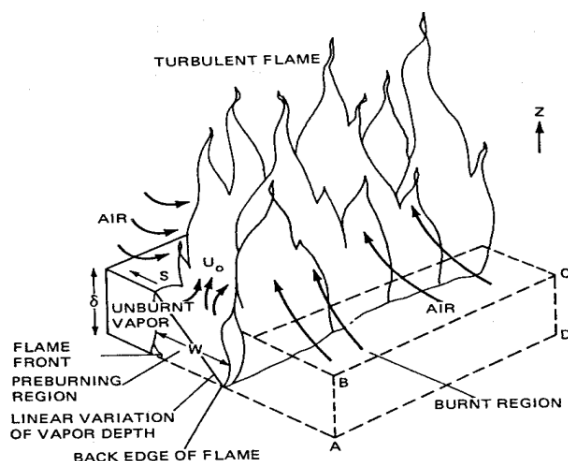


Figura 4.20: Flash Fire

In presenza di un'immediata ignizione²⁰, la piccola quantità di gas infiammabile che si è miscelato con l'aria fino a quel momento per formare una miscela infiammabile, prende fuoco coinvolgendo poi la rimanente massa di gas infiammabile, con concentrazione maggiore del limite superiore di infiammabilità, in una fiamma di tipo diffusivo²¹ (il cosiddetto flash-fire, Figura 6.8). I tempi caratteristici del rilascio dell'energia di combustione in questo caso sono determinati dalla velocità del trasporto di combustibile e aria verso la fiamma e risultano quindi troppo elevati per poter generare un'esplosione.

Nel caso di un flash fire, le conseguenze dell'innescò della nube di sostanza infiammabile allo stato di gas o vapore sono rappresentate dalla radiazione termica. Si noti che in alcuni casi, la nube infiammabile, anziché bruciare, può esplodere, dando luogo sia ad irraggiamento termico che ad un'onda di pressione: questo fenomeno va sotto il nome di esplosione di nube di vapori non confinata o UVCE (unconfined vapor cloud explosion) e sarà esaminata nel dettaglio nel capitolo successivo. Per quanto riguarda l'incendio della nube infiammabile, o flash fire, si può valutare la radiazione termica ipotizzando la forma della nube, solitamente posta uguale ad un mezzo ellissoide, e stimando la temperatura a cui essa brucia. Il volume e la superficie del semiellissoide che rappresenta la nube sono funzione dei coefficienti di dispersione della nube e dei

²⁰ Si veda il diagramma logico a pag.147

²¹ Una **fiamma premiscelata** è una fiamma che si propaga in una miscela combustibile-aria; una **fiamma diffusiva** è invece una fiamma che si stabilisce all'interfaccia tra il combustibile e l'aria non miscelati.



Figura 4.21: Flash fire di una nube densa di vapori infiammabili.

limiti di infiammabilità. Questo approccio presenta però incertezze sia nella valutazione della superficie esterna della nube che della sua temperatura.

Solitamente si preferisce quindi considerare semplicemente che tutto ciò che si trova al di sotto della nube infiammabile subisca le conseguenze dalla radiazione termica. In pratica, ci si limita a valutare l'estensione della nube basandosi sulle equazioni adottate per la dispersione di gas e vapori in aria.

Come nube infiammabile viene considerata tutta la zona in cui la concentrazione della miscela infiammabile-aria si trova al di sopra del limite inferiore di infiammabilità.

4.3.5 Effetti degli incendi

Un incendio può procurare danni diretti alle persone, in forma di ustioni più o meno gravi, ma anche di asfissia, in quanto l'ossigeno viene consumato dalla combustione e si possono formare prodotti di combustione tossici (ambienti chiusi). Un incendio, inoltre, può provocare danni, anche notevoli, ad edifici ed apparecchiature, con possibile effetto 'domino' in cui il cedimento di un'apparecchiatura esposta al fuoco causa altro rilascio di prodotto infiammabile e un nuovo incendio.

Effetti termici sulle strutture

Per quanto riguarda gli effetti degli incendi sulle strutture, quelle in legno o in materiali combustibili sono soggette a bruciare, mentre le altre, e in particolare quelle metalliche, vanno incontro a cedimento strutturale dovuto alla riduzione della resistenza meccanica con la temperatura. A 500-600°C si ha il rapido collasso delle strutture in acciaio, mentre quelle in cemento resistono più a lungo. La tabella seguente riporta gli effetti dell'incendio su alcuni materiali da costruzione in funzione del valore del calore trasmesso per irraggiamento.

Effetto	Irraggiamento (kW/m ²)
Danneggiamento di cavi elettrici	11.7
Danneggiamento di serbatoi metallici	12.6
Innesco di incendi di materiale infiammabile	26.0
Ignizione del legno in 1 minuto	33.0
Danneggiamento di strutture in acciaio	40.0
Danneggiamento di strutture in calcestruzzo	60.0

Giova ricordare che la normativa per serbatoi di stoccaggio GPL riportata nella G.U. del 9.7.1996, indica come valore limite, superato il quale si possono verificare danni alle strutture, quello di 12,5 kW/m², nel caso di radiazione termica stazionaria, come quella di un incendio da pozza.

Effetti termici sulle persone

I danni indotti dal calore comprendono la disidratazione dei tessuti, la difficoltà di respirazione e le ustioni: la massima temperatura sopportabile dalla pelle nuda è di 150°C, per brevissimo tempo e in assenza di umidità. Alle concentrazioni di vapor acqueo generalmente sviluppate dagli incendi, la massima temperatura dell'aria che è possibile respirare per breve tempo è di 60°C. Le ustioni sono classificate come:

- di I grado: superficiali; sono facilmente guaribili;
- di II grado: si ha formazione di bolle e vesciche; va consultata una struttura sanitaria;
- di III grado: profonde; richiedono immediata ospedalizzazione.

La gravità delle ustioni riportate può essere correlata all'irraggiamento subito secondo quanto indicato da Eisemberg, come riportato nella tabella seguente. Approcci semplificati suggeriscono direttamente una soglia di intensità di radiazione a cui corrisponde un certo effetto: ad esempio, lesioni gravi a 5 kW/m^2 e morte a 10 kW/m^2 .

Effetto	Irraggiamento (kW/m^2)
Nessuno per persone vestite, anche per lunghe esposizioni	1.4
Ustioni di I grado	1.8
Ustioni di II grado	2.0
Danni a operatori con indumenti protettivi per lunghe esposizioni	5.0
50% di probabilità di sopravvivenza	19.0
1% di probabilità di sopravvivenza	40.0

Per gli incendi di nubi di vapori (flash fire) si considerano soglie di danno in funzione dell'area coperta dalla nube, intendendo per nube infiammabile quella parte della miscela aria-combustibile che è a concentrazione al di sopra del limite inferiore di infiammabilità o a metà di tale valore.

Per i fireball, in cui l'esposizione è di breve durata, si utilizza invece generalmente un criterio basato sull'energia termica assorbita dalla pelle: il livello di mortalità viene spesso fissato a 160 kJ/m^2 , anche se già ad 80 kJ/m^2 si hanno ustioni che, a volte, risultano fatali.

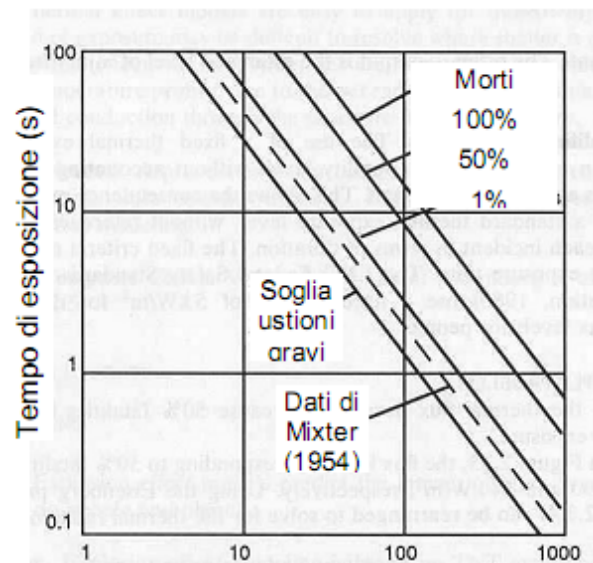
Scenario incidentale	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili
Incendio (radiazione termica stazionaria)	12.5 kW/m^2	7 kW/m^2	5 kW/m^2	3 kW/m^2
Fireball (radiazione termica variabile)	Raggio fireball	350 kJ/m^2	200 kJ/m^2	125 kJ/m^2
Flash fire (radiazione termica istantanea)	LFL	$\frac{1}{2}$ LFL	-	-

Tabella 4.3: Valori di riferimento previsti dalla G.U. del 9.7.1996 per varie tipologie di incendio di serbatoi di stoccaggio GPL

Approcci più precisi tengono conto, oltre che dell'intensità della radiazione, anche della durata dell'esposizione, ed esprimono i risultati in termini di probabilità di subire un danno, quale un'ustione grave o la morte, come mostra la Figura 4.22.

4.4 Le esplosioni

Un'esplosione viene definita in generale come un rilascio di energia in un tempo sufficientemente breve ed in un volume sufficientemente piccolo da generare un'onda di

Figura 4.22: Radiazione termica incidente kW/m²

pressione di entità finita, che si allontana dal punto di rilascio e che può essere udita. Nello specifico in questa sede si trattano due tipi di esplosioni associate al GPL:

1. esplosioni di nubi di vapore in ambiente non confinato (Unconfined Vapour Cloud Explosions, UVCE)²²;
2. esplosioni fisiche di vapori che si espandono a causa dell'ebollizione del liquido (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions).



Figura 4.23: BLEVE di GPL.

²²trattate al Capitolo successivo

4.4.1 BLEVE

Il BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) è un fenomeno di esplosione fisica²³ tipicamente associato alla fessurazione di serbatoi contenenti gas liquefatti per compressione (come appunto il GPL) esposti a un incendio (Fig.4.24); quando il serbatoio a seguito del riscaldamento cede e si fessura, il vapore presente nel serbatoio fuoriesce dalla fessura portando istantaneamente il liquido presente a pressione ambiente (espansione); il liquido si ritrova quindi in condizioni di elevato surriscaldamento ed evapora in modo violento e istantaneo; l'evaporazione è così violenta (solitamente indicata con RPT, Rapid Phase Transition) che il vapore formato non riesce a sfogare attraverso la fessura e pressurizza quindi nuovamente il serbatoio, provocandone l'esplosione; inoltre, come già si è detto, la presenza dell'incendio fornisce solitamente l'innesco immediato necessario a innescare il fenomeno del fireball.

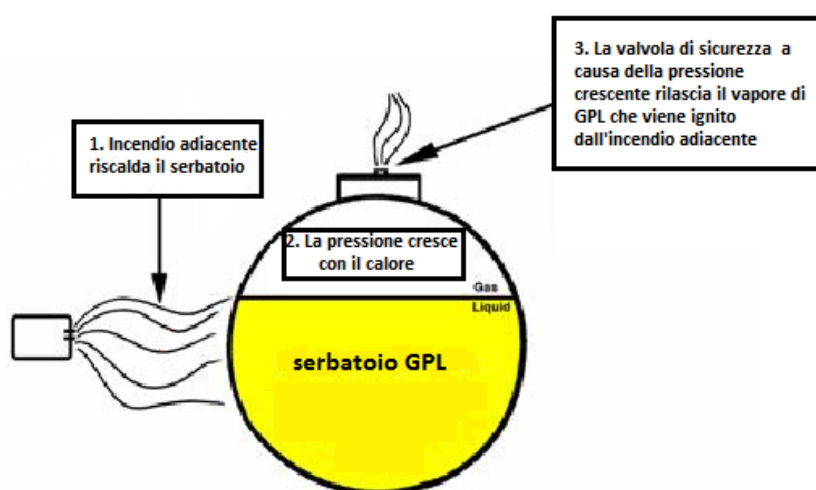


Figura 4.24: Fasi antecedenti al BLEVE di un serbatoio di GPL.

Il meccanismo di formazione dell'onda d'urto può sempre essere schematizzato con un pistone che accelera, come per il caso delle esplosioni ideali (si veda il capito-

²³Con il termine esplosione fisica si intende un'esplosione che non coinvolge, nel meccanismo di rilascio dell'energia, alcuna reazione chimica. Le BLEVE rientrano in questa categoria, in quanto sono esplosioni derivanti dalla rapida espansione di gas compresso e/o di un vapore prodotto da una rapida transizione di fase.

lo seguente, pag. 153). La principale differenza risiede nel fatto che sia il volume in cui viene rilasciata l'energia, sia il tempo utilizzato per tale rilascio non sono più praticamente nulli come nel caso delle esplosioni ideali.

Non tutta l'energia contenuta nel gas compresso viene utilizzata per generare l'onda d'urto. Una parte consistente di questa energia viene dispersa da diversi fenomeni, quali per esempio la deformazione plastica del recipiente prima del collasso o l'energia cinetica conferita ai frammenti del recipiente.

Come stima di massima, si può assumere che:

- circa il 30% dell'energia presente nel gas compresso generi l'onda d'urto;
- circa il 40% fornisca energia cinetica ai frammenti che possono quindi essere proiettati a distanze considerevoli,
- il rimanente 30% venga dissipato.

Come già si è detto, negli istanti precedenti l'esplosione si ha una violenta evaporazione del liquido rimasto nel serbatoio a seguito della fessurazione o cedimento dello stesso a causa del riscaldamento. In questo caso, il tempo caratteristico della transizione di fase è estremamente ridotto (dell'ordine dei ms).

La teoria classica del BLEVE spiega l'aumento della velocità di evaporazione assumendo che si inneschi il fenomeno di nucleazione omogenea, cioè la formazione di bolle in seno al liquido in assenza di centri di nucleazione solitamente forniti dalle asperità presenti sulle pareti del recipiente. La nucleazione omogenea rende il fenomeno del flash molto più rapido e quindi l'intensità dell'onda d'urto generata molto maggiore.

Inoltre, nel caso in cui il recipiente non collassi completamente ma, come avviene più comunemente, semplicemente si fessuri con una conseguente rapida depressurizzazione, l'estrema rapidità dell'evaporazione non consente al vapore formatosi di scaricarsi senza pressurizzare ulteriormente il recipiente, che quindi solitamente collassa in modo catastrofico proiettando frammenti nell'ambiente circostante.

La nucleazione omogenea può avere luogo solo se il liquido è sufficientemente surriscaldato. Non è quindi sufficiente che la temperatura del liquido sia superiore alla sua temperatura di ebollizione normale, ma deve anche essere superiore a un altro valore limite caratteristico di ciascun composto.

In sintesi, perché si possa avere un BLEVE è necessario che siano rispettate due condizioni:

1. prima condizione: il liquido deve essere surriscaldato, cioè portato rapidamente in condizioni di non equilibrio caratterizzate da una temperatura superiore alla sua temperatura di ebollizione a pressione atmosferica. La rapidità dell'operazione è una condizione necessaria per impedire che il liquido evapori portandosi nelle condizioni di equilibrio non in modo pressoché istantaneo, cioè coi tempi caratteristici molto brevi necessari per generare un'esplosione, ma in modo graduale, cioè con tempi caratteristici lunghi, incompatibili col formarsi di un'esplosione. Nel caso del GPL il surriscaldamento del liquido avviene per rapida depressurizzazione (per esempio, a seguito del collasso/frattura del serbatoio);
2. seconda condizione: il surriscaldamento deve essere sufficiente, cioè la temperatura deve essere superiore al valore limite per l'innesco della nucleazione omogenea.

Il valore della temperatura critica per l'innesco della nucleazione omogenea, T_{SL} , in funzione della pressione può essere stimato per composti idrocarburi puri tramite la relazione:

$$T_{SL} = T_C(0,11P_r + 0,89)$$

dove

T_C = temperatura critica (K);

P_r = pressione ridotta.

A pressione atmosferica la relazione precedente è ben approssimata da:

$$T_{SL} \approx 0,895T_C \quad (4.15)$$

ne segue che per il propano puro, essendo $T_C = 96,67^\circ\text{C}$, $T_{SL} \approx 58^\circ\text{C}$.

Ovviamente per miscele di idrocarburi come il GPL il valore di T_{SL} può essere approssimato da una media pesata sulle frazioni molari dei valori della temperatura critica per l'innesco della nucleazione omogenea dei composti puri.

La seconda condizione (surriscaldamento sufficiente) viene rappresentata graficamente in Figura 4.25 per un evento incidentale coinvolgente, a titolo di esempio, il riscaldamento di un recipiente contenente un gas liquefatto. Nella 4.25 sono riportate le curve della tensione di vapore e quella limite di surriscaldamento per la nucleazione omogenea.

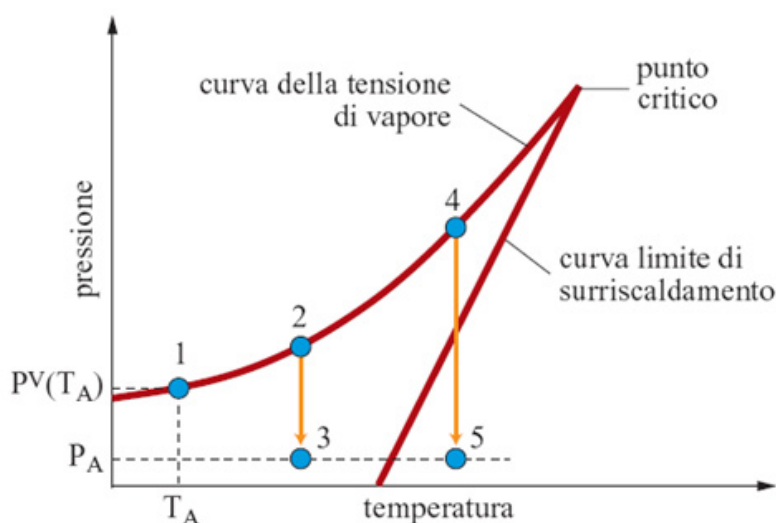


Figura 4.25: Curve della tensione di vapore e del surriscaldamento limite per la nucleazione omogenea.

Assumendo che il fluido contenuto in un recipiente si trovi nel punto 1 (che si trova sulla curva della tensione di vapore, essendo il liquido in equilibrio con il suo vapore alla temperatura ambiente, T_A , a una pressione pari alla tensione di vapore a quella temperatura, $P_V(T_A)$), un riscaldamento accidentale del serbatoio può portare le condizioni del liquido (che, essendo sempre in equilibrio con il suo vapore, sono sempre rappresentate da un punto sulla curva della tensione di vapore) nel punto 2. Se a questa pressione il contenitore cede, la pressione crolla istantaneamente al valore atmosferico, P_A , rappresentato dal punto 3. Il liquido si trova quindi in condizioni di non equilibrio, in quanto la sua temperatura è superiore a quella di ebollizione normale, e quindi evaporerà rapidamente. Non può però innescarsi il fenomeno della nucleazione omogenea perché il surriscaldamento del liquido non è sufficiente. Se invece il collasso del serbatoio avviene quando la temperatura (e di conseguenza la pressione) del liquido è arrivata al punto 4, la brusca depressurizzazione porta il liquido nelle condizioni caratterizzate dal punto 5, oltre il confine per la nucleazione omogenea. In questo caso è possibile l'innescarsi di un BLEVE.

BLEVE con GPL

Si consideri la Figura 4.26, nella quale è rappresentato un serbatoio che ha subito un danno e da cui fuoriesce un getto di GPL che si è infiammato (jet fire).

Nelle vicinanze dello stesso si trova un secondo serbatoio che è esposto all'irraggiamento termico del primo. In generale un incendio nelle vicinanze di un serbatoio può portare a considerevoli aumenti della pressione (tensione di vapore) del GPL all'interno del recipiente coinvolto anche con scambi termici non elevatissimi. Nell'ipotesi che il serbatoio sia costruito a regola d'arte (corrosioni della superficie di protezione, danneggiamenti per urti, mancanze del costruttore, possono rendere il susseguirsi degli eventi imprevedibili), è possibile prevedere il fenomeno con una certa precisione.

Alcuni dei fattori che influenzano l'evento sono:

- ✓ stress termico e meccanico (gli acciai dei serbatoi di GPL possono cedere a pressioni comprese tra 15 e 20 bar se le pareti sono portate a temperature prossime a 700°C) del serbatoio;
- ✓ la temperatura raggiunta dal mantello del contenitore e quella dei diversi strati di GPL;
- ✓ la quantità di energia accumulata (il grado di riempimento del serbatoio);
- ✓ gli scambi termici.

Certo è che per il verificarsi dell'esplosione del serbatoio si devono realizzare le condizioni preliminari descritte al paragrafo precedente (depressurizzazione del liquido, surriscaldamento dello stesso e nucleazione spontanea).

Il recipiente che sopporta alte pressioni contenente GPL subisce a causa dello stress termico e meccanico una piccola perdita (la valvola di sicurezza, se mal progettata, aprendosi può provocare lo stesso rapido calo di pressione), facendo fuoriuscire del vapore all'esterno e provocando così un repentino abbassamento di pressione.

Il GPL liquido viene pertanto a trovarsi ad una temperatura più alta rispetto alla situazione normale di equilibrio per quella determinata pressione (a temperatura e pressione ambiente il GPL dovrebbe essere vapore). Quindi la massa liquida, che si trova all'interno del serbatoio, si surriscalda ed è così pronta a trasformarsi rapidamente in vapore intorno a certi germi o nuclei di ebollizione.

Basta che una piccola percentuale del GPL liquido si trasformi in un tempo molto breve in vapore, per provocare effetti catastrofici. Il tempo in cui avviene il BLEVE con GPL può essere estremamente rapido (da pochi millisecondi a un decimo di secondo) oppure più lento (qualche secondo).

La rapida espansione del GPL liquido trasformatosi in vapore, produce la distruzione del serbatoio e la conseguente nuvola di combustibile e aria che si infiamma immediatamente. La combustione produce una grande quantità di vapore acqueo che appare

come una nube biancastra a causa della rapida condensazione che trasforma il vapore in minuscole goccioline (Figura 4.23).

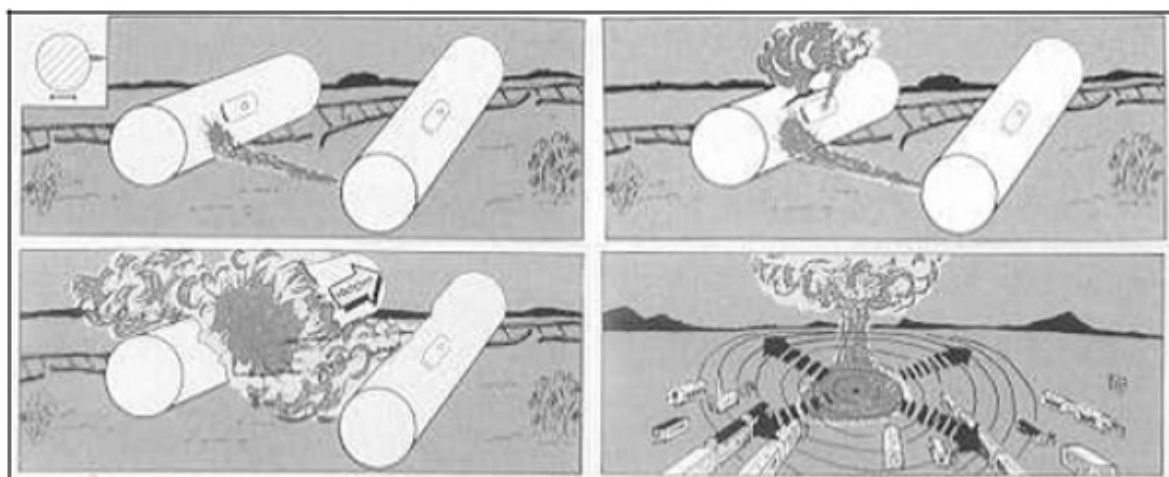


Figura 4.26: Possibile scenario per BLEVE da GPL

Affinché si verifichi la rottura, vale la pena di ricordare inoltre che la temperatura del GPL all'interno del serbatoio debba essere superiore a 53°C (con pressioni maggiori di 16,5 bar); la pratica è infatti quella di tarare le valvole di sicurezza a 16 bar, una pressione minore del valore che può condurre al BLEVE. Il valore di 53°C rappresenta il limite della temperatura di surriscaldamento del propano liquido alla pressione atmosferica, in accordo con quanto stimato con la eq.(4.15).

Al fine di prevenire il BLEVE dei serbatoi per lo stoccaggio del GPL occorre allora:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Limitare la pressione: <ul style="list-style-type: none"> - Valvole di sicurezza - Evacuazione liquido • Limitare la temperatura: <ul style="list-style-type: none"> - Prevenzione incendio - Raffreddamento con impianti fissi, schiuma, barriere di acqua - Coibentazione dei serbatoi | <ul style="list-style-type: none"> • Prevenire gli shock del serbatoio: <ul style="list-style-type: none"> - Uso di acciai duttili ed elastici - Inserimento all'interno del serbatoio di struttura alveolare in lega di alluminio - Uso di additivi che abbassano la probabilità che si verifichi la nucleazione spontanea |
|--|---|

CAPITOLO 5

UNCONFINED VAPOR CLOUD EXPLOSIONS

Il presente capitolo si propone di analizzare una delle più gravi ipotesi incidentali associate alla perdita accidentale di gas liquefatti come il GPL: l'esplosione di una nube di vapore in ambiente non confinato, il cui acronimo è UVCE, dall'inglese Unconfined Vapor Cloud Explosion. In realtà la dicitura UVCE è stata molto utilizzata fino ai primi anni '80 [60]. Oggigiorno invece in letteratura viene più spesso adottato semplicemente l'acronimo VCE, Vapor Cloud Explosions, dal momento che si è compreso che, durante la combustione di una nube di vapore, affinché si producano onde d'urto di entità apprezzabile e tali da provocare danni, è necessario un certo livello di confinamento (o congestionamento) in grado di accelerare la fiamma per effetto della turbolenza generata dall'interazione della stessa con ostacoli. Per questa ragione il termine 'ambiente non confinato' (unconfined) viene a volte omissivo. L'aggettivo 'non confinato' voleva sostanzialmente descrivere esplosioni in aree aperte, come quelle in cui si trovano gli impianti di processo. Tuttavia test realizzati su larga scala hanno dimostrato che una nube di vapore veramente non confinata e non ostruita da ostacoli, se innescata da una debole sorgente di ignizione, produce solo piccoli incrementi di pressione durante la combustione [58]. Questo fenomeno è il *flash fire* o *incendio di nube*, ed ha come conseguenza più grave la relativa radiazione termica.

Durante l'esplosione di una nube di vapore (VCE o UVCE) l'aspetto più pericoloso è invece l'onda di pressione che può investire, direttamente o indirettamente, persone e strutture.

Si capisce quindi perché il termine 'unconfined' vada utilizzato con attenzione. Ad esempio negli impianti di processo vi sono delle aree che a livello locale sono caratterizzate

da confinamento parziale o sono ostruite da elementi strutturali. In caso di deflagrazione sono proprio queste zone a causare alte pressioni d'esplosione, come mostrato in figura 5.1.

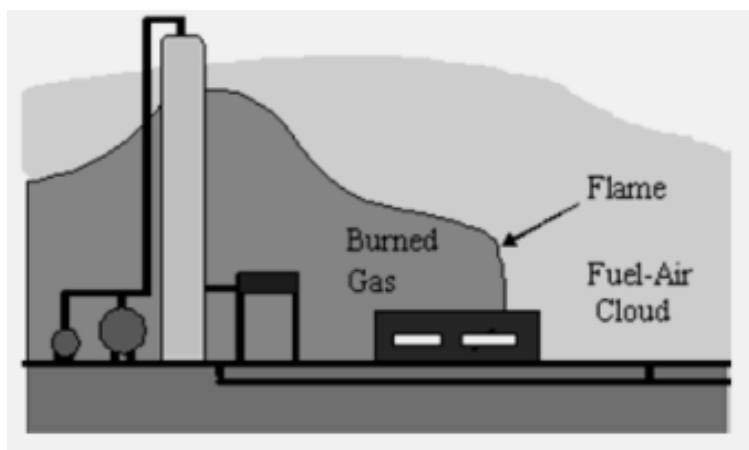


Figura 5.1: Esplosione di gas in un'area di processo

Si noti però che i parametri che influenzano l'insorgere di una VCE sono numerosi e non sono circoscritti al solo congestionamento e confinamento parziale. L'intensa attività di ricerca successiva a incidenti catastrofici come quello di Flixborough (UK, 1974) ha portato a riconoscere che l'esplosione di una nube di vapore infiammabile, e quindi la relativa onda di pressione, dipendono anche dalla massa di combustibile coinvolta, dall'energia della sorgente di ignizione e dalla sua collocazione rispetto alla nube, dalle condizioni atmosferiche (turbolenza e ventosità), che causano miscelamento e/o dispersione del vapore di combustibile, etc...

E' tuttavia importante specificare che la conoscenza del fenomeno delle VCE presenta a tutt'oggi numerose falle e non esiste un modello teorico pienamente soddisfacente, nonostante i continui progressi nella modellazione, che verranno illustrati nel seguito della trattazione. Nella pratica, per lo studio e la previsione degli effetti delle VCE, si cerca di combinare input teorici ed empirici [60].

Va inoltre sottolineato che, tra tutte le sostanze infiammabili, non solo i gas liquefatti sono ottimi candidati per le VCE, ma anche i liquidi volatili surriscaldati, i gas ad alta pressione e i liquidi refrigeranti. Ad esempio, l'incidente di Flixborough da VCE, ampiamente discusso più avanti in questo capitolo, coinvolgeva cicloesano (liquido volatile surriscaldato).

Pertanto, nel tentativo di stabilire se il GPL sia una scelta accettabile dal punto di vista della sicurezza, nel seguito verranno anche presentati diversi incidenti catastrofici da

esplosione di nubi di vapore, per stabilire se effettivamente i gas di petrolio liquefatti siano o meno statisticamente i principali responsabili.

5.1 Descrizione del fenomeno d'esplosione UVCE

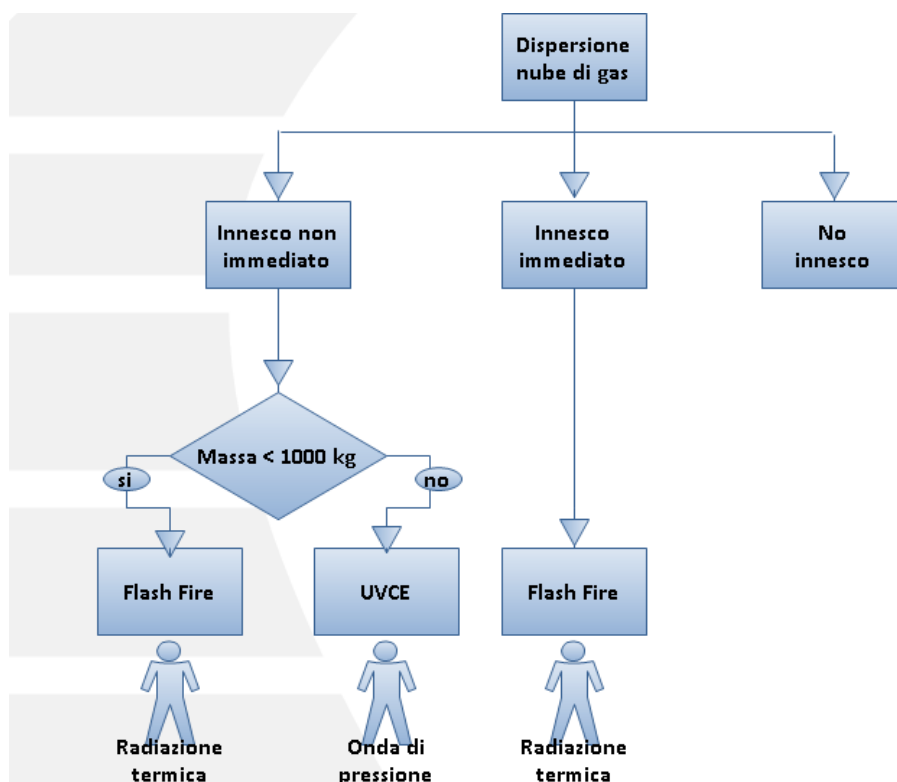


Figura 5.2: Diagramma logico per la generazione di un'esplosione o di un incendio a partire dalla dispersione di un gas infiammabile come il GPL.

Perché si possa avere l'esplosione di una nube di vapori è necessario che una consistente quantità di vapori infiammabili venga dispersa in atmosfera senza trovare un innesco immediato. Infatti se l'innesco non è immediato la nube ha tempo di disperdersi e quindi di creare una quantità significativa di miscela gas-aria con concentrazione interna ai limiti di infiammabilità. In questo caso si può avere non solo un flash fire, ma anche un'esplosione (UVCE) le cui conseguenze principali sono legate, oltre che alla presenza di una regione investita dalla fiamma, alla sovrappressione generata. Il motivo per cui è necessario che una quantità significativa di miscela gas-aria abbia una concentrazione interna ai limiti di infiammabilità per originare un'esplosione (da cui deriva che piccoli rilasci di gas infiammabile, generalmente inferiori a **1000 kg** di gas eccetto

composti particolarmente reattivi quali idrogeno, acetilene, ossido di etilene etc..., non possono esplodere, così come non possono esplodere nubi innescate immediatamente dopo il rilascio) può essere spiegata considerando il meccanismo con cui una fiamma (nel seguito tale fiamma sarà indicata anche con il termine *onda di combustione*) che si propaga in una miscela infiammabile può generare un'onda di pressione.

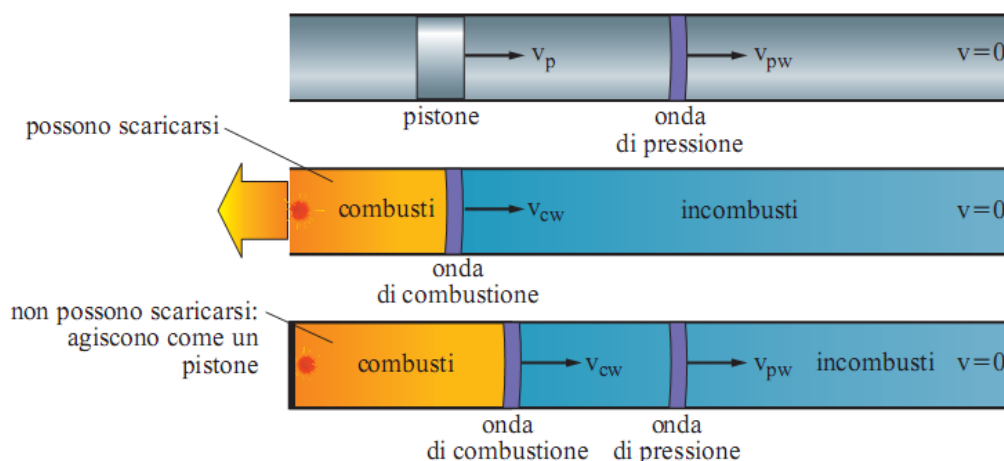


Figura 5.3: Propagazione di un'onda di combustione in una tubazione:

- v_p è la velocità del pistone;
- v_{pw} è la velocità dell'onda di pressione;
- v_{cw} è la velocità dell'onda di combustione.

Il meccanismo di generazione di un'onda di pressione da parte di una fiamma è analogo a quello di un pistone che accelera. Si consideri quindi l'analogia tra un tubo riempito di miscela infiammabile ignita a una estremità e il moto di un pistone, schematizzata in Fig. 5.3.

Se la tubazione è aperta su entrambi i lati, i gas combusti (che si trovano a una temperatura molto maggiore di quelli incombusti e quindi hanno una densità molto minore) si espandono e si scaricano dall'apertura vicina al punto di innesco. La fiamma (cioè l'onda di combustione) si propaga quindi nei gas incombusti in quiete con una velocità caratteristica della miscela infiammabile in questione. Se invece il tubo è chiuso all'estremità vicina al punto di innesco, i gas combusti che si espandono non possono scaricarsi e di conseguenza si spostano verso i gas incombusti, che vengono quindi messi in movimento. L'espansione dei gas combusti si comporta in modo analogo a un pistone che spinge i gas incombusti e genera un'onda di pressione.

Una **nube di vapori infiammabili innescata al centro si comporta in modo analogo**¹, con l'unica differenza della geometria emisferica del pistone che accelera.

Perché l'onda di pressione assuma valori significativi è però necessario che il fronte di fiamma acceleri significativamente, così da consentire la formazione di un'onda d'urto come conseguenza del meccanismo di sovrapposizione delle onde di compressione generate da un pistone che accelera. In altri termini, dato che il volume in cui viene rilasciata l'energia non è trascurabile, è necessario che il tempo caratteristico di rilascio dell'energia stessa sia sufficientemente breve².

La velocità con cui il fronte di fiamma avanza non dipende solo dalle caratteristiche chimico-fisiche della miscela infiammabile (riassunte nel parametro s_L chiamato *velocità laminare di fiamma*), ma anche dalla fluidodinamica che determina il livello di turbolenza della miscela infiammabile in cui si propaga la fiamma.

La propagazione del fronte di fiamma nei gas incombusti è guidata dal trasporto di calore e di specie radicaliche dai gas combusti ad alta temperatura agli incombusti a bassa temperatura, come schematizzato in Figura 5.4.

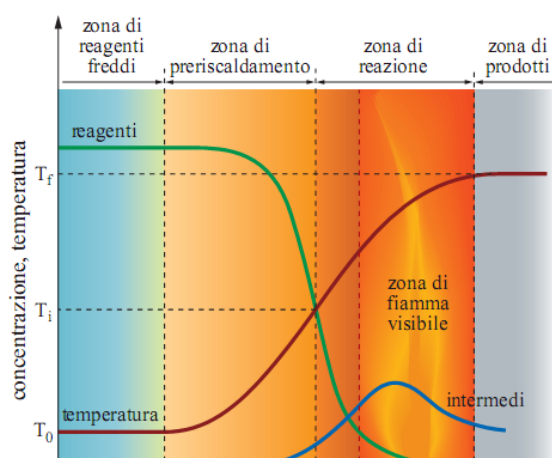


Figura 5.4: Schematizzazione del fronte di una fiamma che si propaga in una miscela infiammabile

Se la fiamma si propaga in gas incombusti in quiete i fenomeni di trasporto di calore e materia sono determinati dai coefficienti efficaci di trasporto (diffusività molecolare e

¹per comprendere il fenomeno della UVCE si fa riferimento allo schema ideale di una fiamma emisferica.

²Un'esplosione è infatti definita come il rilascio di energia in atmosfera in un tempo abbastanza breve e in un volume abbastanza piccolo da generare un'onda di pressione di entità finita che si allontana dalla sorgente e che può essere udita.

conducibilità termica) secondo le leggi di Fick e di Fourier e la fiamma si propaga con una ben determinata velocità, che per miscele di idrocarburi e aria leggermente più ricche di combustibile rispetto alla composizione stechiometrica è solitamente dell'ordine di 0,5 m/s.

Combustibile	s_L [cm/s]
acetilene	142
idrogeno	280
benzene	49
butano	37
butene	43
cicloesano	41
eptano	40
esano	40
etano	40
etene	65
metano	35
pentano	40
propano	40
propene	51

Tabella 5.1: Valori della massima velocità laminare di fiamma, s_L , di alcuni gas combustibili

Se però il fronte di fiamma agisce come un pistone che mette in movimento i gas incombusti, all'aumentare della velocità di questi gas aumenta anche il livello di turbolenza. Inoltre, la presenza di ostacoli (edifici, alberi) investiti dal moto dei gas incombusti provoca un'ulteriore aumento della turbolenza. L'effetto principale di un moto non più laminare ma turbolento dei gas incombusti risiede nell'aumento della velocità di trasferimento di calore e materia dalla fiamma ai gas incombusti. Infatti, il valore dei coefficienti efficaci di trasferimento di calore e materia (diffusività materiale e termica turbolenta) è solitamente molto maggiore degli analoghi valori caratteristici dei fenomeni molecolari. Questo aumento della velocità di trasporto di materia e calore si riflette su un analogo aumento della velocità della fiamma (cioè dell'onda di combustione) e quindi in un sempre più marcato aumento dell'accelerazione del fronte di fiamma (analogo del pistone) e infine nella generazione di onde di pressione di entità sempre maggiore.

In conclusione:

perché l'esplosione di una nube di vapori possa generare una sovrappressione significativa, ma comunque limitata al valore massimo di circa 1 bar, è necessario che la fiamma acceleri significativamente. Perché questo avvenga è necessario da un lato che siano presenti degli ostacoli per aumentare il livello di turbolenza nei gas incombusti, e dall'altro che la nube si estenda su un'area sufficientemente grande da dare il tempo ai meccanismi di accelerazione del fronte di fiamma di diventare efficaci.

Essendo i vapori di GPL più pesanti dell'aria, essi tendono a stratificarsi al suolo dove è presente un maggiore congestionamento. Tipicamente condizioni di parziale confinamento possono verificarsi in alcune aree del deposito di GPL³. Pertanto se la quantità di combustibile, a seguito del rilascio, evaporazione e dispersione del gas liquefatto è notevole ($M_{\text{GPL}} \geq 1000\text{kg} \Rightarrow \geq 540\text{m}^3$ di gas), in seguito all'innescio si può avere una *deflagrazione* della nube (combustione con velocità di propagazione di fiamma subsonica) con fenomeni esplosivi.

Se il quantitativo di GPL è minore di una tonnellata ($\sim 2\text{m}^3$ di GPL liquido) la probabilità che si verifichi l'esplosione è bassa (un caso su cento, 1%); con quantitativi di 10 tonnellate ($\sim 20\text{m}^3$ di liquido evaporato) la probabilità sale al 10%. Infine si ha la certezza del disastro con un'evaporazione di 1000 tonnellate ($\sim 2000\text{m}^3$ di liquido evaporato) come riassunto nella tabella che segue [63]:

Quantità di GPL [tonn]	Probabilità UVCE [%]
<1	1
10	10
1000	100

5.1.1 Combustione: deflagrazione vs. detonazione

Oltre alla deflagrazione appena trattata, un'altra modalità di combustione di nubi premiscelate è la *detonazione*, in cui la velocità della fiamma raggiunge (rispetto ai gas incombusti) valori supersonici, e conseguentemente la sovrappressione può raggiungere valori di decine di bar.

³o come nella stazione di Viareggio, dove le abitazioni distano 11 m creando congestionamento.

Se l'accelerazione della fiamma diventa notevole è possibile che l'onda d'urto (onda di compressione) che viene creata provochi un aumento di temperatura dei gas incombusti attraverso cui si propaga tale da innescarli. In questo caso non è più l'onda di combustione che, col meccanismo del pistone che accelera, genera l'onda di pressione che si propaga davanti ad essa, ma è il passaggio dell'onda di pressione che innesca la miscela infiammabile e genera l'onda di combustione. L'energia liberata dalla combustione consente poi all'onda di pressione di sostenersi.

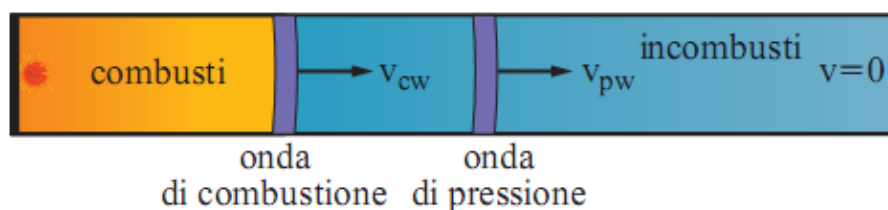


Figura 5.5: Schema concettuale di una deflagrazione

I due fenomeni, deflagrazione e detonazione, sono marcatamente diversi. Nel primo caso (onda di combustione che genera l'onda di pressione) le due onde (di pressione e di combustione) sono disgiunte e la velocità dell'onda di combustione è subsonica (dell'ordine dei **m/s**) rispetto alle condizioni dei gas incombusti davanti al fronte di fiamma. I valori di sovrappressione a cavallo dell'onda di pressione, come si è già detto, sono modesti (al massimo 1 bar nel caso di UVCE) e pressione e densità diminuiscono attraverso l'onda di combustione. Si parla in questo caso di **deflagrazioni** e la fenomenologia è schematizzata nella fig. 5.5. Anche la forma del picco di pressione⁴ rilevato da un osservatore posto a una certa distanza dal centro della nube di vapori è diversa da quella di un'esplosione ideale⁵ (impulso di pressione $i_p = \int_0^{t_D} P dt$) schematizzata in fig. 5.7. In particolare, il gradiente di pressione risulta meno marcato, come mostrato nella fig. 5.6.

⁴Il picco di pressione, che prende il nome di sovrappressione incidente (side-on overpressure), è definita come la sovrappressione (rispetto al valore atmosferico) che si ha a lato di una struttura colpita dall'onda d'urto.

⁵Sono definite ideali le esplosioni in cui la sorgente di energia che causa l'esplosione stessa può essere considerata come puntiforme e il rilascio di energia può essere considerato istantaneo (o, in termini analoghi, l'energia viene rilasciata in un volume praticamente nullo e in un intervallo di tempo praticamente nullo).

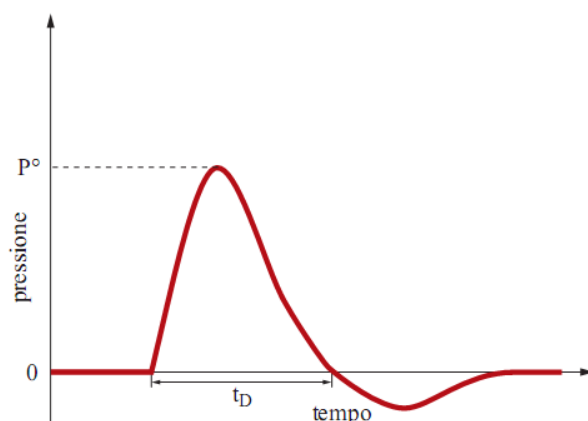


Figura 5.6: Andamento della sovrappressione in funzione del tempo a un'assegnata distanza dall'epicentro di una esplosione di nubi di vapore non confinate (UVCE).

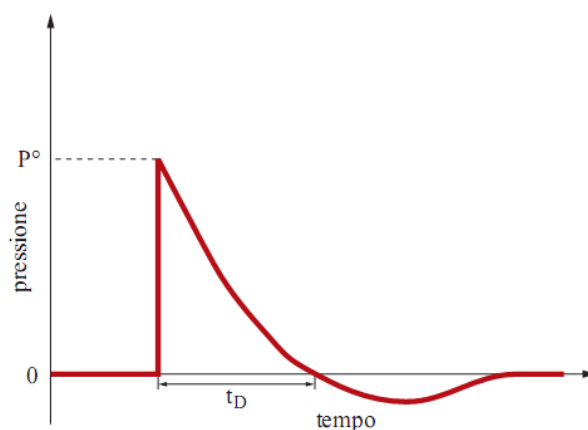


Figura 5.7: Andamento della sovrappressione in funzione del tempo a un'assegnata distanza dall'epicentro di una esplosione ideale: l'onda d'urto generata da un'esplosione ideale si propaga dall'epicentro dell'esplosione a una velocità crescente, fino a raggiungere una velocità limite. La pressione sale praticamente istantaneamente fino al valore di **sovrappressione incidente** (side-on overpressure), P^o , per poi ridiscendere gradualmente man mano che il fronte dell'onda d'urto si allontana. In questa fase la sovrappressione può anche assumere valori negativi, che corrispondono a valori della pressione assoluta inferiori a quella atmosferica. Questi valori di sovrappressione negativa sono solitamente modesti e raramente eccedono 30 kPa.

Nel secondo caso (onda di pressione che genera l'onda di combustione) le due onde (di pressione e di combustione) sono accoppiate e la loro velocità è supersonica (dell'ordine di alcune **migliaia di m/s**) rispetto alle condizioni dei gas incombusti davanti al fronte di fiamma. I valori di sovrappressione a cavallo dell'onda di pressione sono elevati (alcune decine di bar) e pressione e densità aumentano attraverso l'onda di pressione

e combustione accoppiate. Si parla in questo caso di **detonazioni** e la fenomenologia è schematizzata in fig. 5.8.

La transizione da deflagrazione a detonazione (DDT, Deflagration to Detonation Transition) richiede accelerazioni molto marcate del fronte di fiamma che non è solitamente possibile raggiungere nel caso di esplosioni in campo aperto (UVCE). Viceversa, è un fenomeno abbastanza comune nel caso di esplosioni in tubazioni a causa della turbolenza generata dal moto dei gas incombusti nelle tubazioni [70].

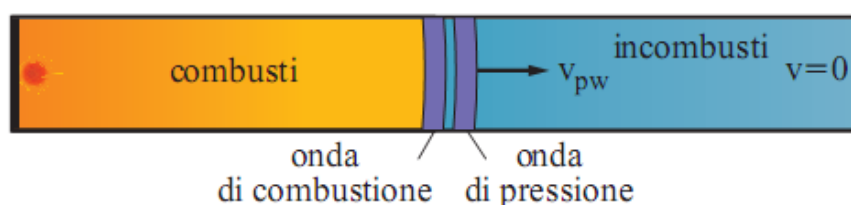


Figura 5.8: Schema concettuale di una detonazione

Quindi le detonazioni di nubi di gas sono un fenomeno raro nella pratica e richiedono solitamente, per combustibili usuali, l'innesco da parte di un detonatore, cioè da parte dell'onda d'urto generata da un esplosivo solido.

Una ragione risiede nella geometria tipica delle nubi di vapore formate dalla dispersione di gas denso, che sono a **forma di frittella** (*pancake shaped*, si veda l'appendice A.4.1). Ciò ha un effetto significativo sulla combustione all'interno della nube stessa. Innanzitutto i gas combustibili hanno la possibilità di espandersi, o di sfuggire, attraverso la sommità della nube; in questo modo si verifica una minore compressione dei gas incombusti che si trovano dinanzi al fronte di fiamma e la velocità di fiamma è di conseguenza più bassa. Inoltre la forma schiacciata sostanzialmente limita la possibilità di detonazione. Infatti, affinché questo fenomeno si verifichi, è necessario un spessore minimo della nube. In riferimento al modello cellulare di un'onda di detonazione reale tridimensionale⁶, lo spessore della nube è funzione della lunghezza di cella λ (*cell size*), che è una caratteristica di ciascun gas⁷. Nel caso di esplosione effettivamente non confinata (minor turbolenza), per avere detonazione lo spessore deve essere almeno dell'ordine di $10-13 \lambda$, mentre nel caso pratico di nube delimitata dal terreno $\lambda = 5 - 6,5$ [60].

In sintesi la detonazione è da escludersi nel caso di nubi premiscelate di GPL, in relazione alle caratteristiche di questo combustibile (reattività e densità), a meno che la miscela non si formi in ambienti chiusi.

⁶cfr. Appendice 228

⁷più la miscela gassosa è reattiva, più piccola è la *cell size*.

5.1.2 Danni alle persone e alle strutture

I danni alle persone e alle strutture causati dal passaggio di un'onda d'urto dipendono da diversi fattori, caratteristici sia dell'onda d'urto sia della struttura o persona colpita. Si possono utilizzare ai fini pratici quattro valori limite per una stima di massima dei danni attesi alle strutture.

1. La distruzione totale delle strutture, che quindi non possono più in alcun modo essere riutilizzate, è attesa per valori di sovrappressione incidente superiore a 0,83 bar.
2. Gravi danni alle strutture, intesi come parziale collasso della struttura stessa a causa dei danni subiti da elementi strutturali, sono attesi per valori di sovrappressione incidente compresi tra 0,83 e 0,35 bar.
3. Danni moderati che implicano gravi danni alla struttura (come, per esempio, la distruzione di pareti), che però può essere riparata, sono attesi per valori di sovrappressione incidente compresi tra 0,35 e 0,17 bar.
4. Danni limitati, quali la rottura di porte e finestre o la fessurazione di pareti o di elementi di copertura, sono attesi per valori di sovrappressione incidente compresi tra 0,17 e 0,035 bar.

In tabella 5.2 sono poi riportati altri valori di sovrappressione e i relativi danni attesi. Si nota come il corpo umano sia molto più resistente delle strutture alle sovrappressioni. Ne consegue, da un lato, che gli impianti industriali sono particolarmente vulnerabili alle esplosioni, che possono innescare incidenti a catena secondo un effetto domino. Dall'altro lato è raro che delle persone perdano la vita per gli effetti diretti di un'esplosione. La perdita di vite umane è solitamente legata a effetti secondari, quali il collasso delle strutture in cui sono presenti delle persone o la proiezione di frammenti dell'apparecchiatura esplosa che possono colpire persone e apparecchiature anche a grandi distanze dalla sorgente.

In ogni caso si osserva che una deflagrazione con sovrappressione di 1 bar (UVCE) può essere catastrofica.

Sovrapressione [kPa]	Danni osservati
0,14	Rumore (137 dB a bassa frequenza, 10-15 Hz)
1,03	Valore tipico per la rottura di vetri
2,07	Valore limite di sicurezza oltre il quale è attesa una probabilità del 95% di non sperimentare danni seri; valore limite per la proiezione dei frammenti; rottura del 10% dei vetri delle finestre; danni lievi ai tetti delle case
4,8	Limitati danni alla struttura delle case
10,0	Valore limite per danni riparabili agli edifici
15,8	Valore limite per seri danni strutturali
20,7	Danni limitati ad apparecchiature industriali pesanti (dell'ordine di 1500 kg)
20,7-27,6	Rottura di serbatoi di stoccaggio
34,5-48,2	Distruzione praticamente completa delle case
68,9	Distruzione totale degli edifici, apparecchiature pesanti (dell'ordine dei 3500 kg) spostate e gravemente danneggiate
100	Valore limite per danni diretti alle persone

Tabella 5.2: Valori limite di sovrappressione per diverse tipologie di danni osservati

Effetto domino

Con effetto domino si intende una catena di incidenti originata da un singolo incidente, come per esempio, un'esplosione, che provoca un secondo incidente (per esempio, la rottura di un serbatoio) con un effetto più pesante del primo incidente.

La principale conseguenza di una UVCE è proprio l'effetto domino. Circa il 65% delle UVCE avvenute ha causato effetti domino, solitamente con conseguenze più gravose rispetto all'effetto diretto termico o di sovrappressione. Questo è una diretta conseguenza del fatto che gli impianti, come si è già detto, sono vulnerabili alle sovrappressioni.

Tra i casi storici ci sono diversi esempi di effetti domino innescati dal lancio di frammenti a seguito dello scoppio di un recipiente in pressione contenente un liquido o un gas infiammabile che cede catastroficamente, come l'incidente in un deposito di GPL di Mexico City del 1984, costato oltre 500 morti.

In quel caso l'evento primario fu una perdita di GPL che originò una UVCE; dopo poco più di 1 minuto avvenne una seconda esplosione molto più grande della prima, immediatamente seguita dal BLEVE di vari serbatoi. Nella successiva ora esplodevano altri 6

serbatoi: 4 serbatoi sferici di piccola capacità si frammentarono completamente mentre altre sfere più grandi caddero al suolo per l'indebolimento delle zampe di sostegno; 12 serbatoi cilindrici furono scagliati a distanza, altri esplosero disintegrandosi in frammenti piuttosto piccoli e tutti i rimanenti furono comunque danneggiati.

Per valutare gli effetti domino esistono metodi deterministici, che stabiliscono se l'evento secondario possa o meno avvenire basando sulla disposizione delle apparecchiature sorgente e bersaglio (lay out) e su soglie di danno, e modelli per la probabilità di propagazione degli effetti, basati su funzioni di probit per apparecchiature specifiche. Va sottolineato che ci sono incertezze sulle soglie da assumere per i danni: ad esempio, in letteratura viene proposto il valore di $37,5 \text{ kW/m}^2$ per i danni da irraggiamento termico, mentre la normativa tecnica italiana (riportata nella G.U. del 9.7.1996) prevede un valore decisamente più basso ($12,5 \text{ kW/m}^2$).

5.2 Stima degli effetti da UVCE

Il calcolo delle sovrappressioni generate da una UVCE richiede la conoscenza di alcuni parametri chiave, tra cui la massa di gas coinvolta nell'esplosione e il punto di ignizione. Per il calcolo della massa di gas coinvolta nell'esplosione si possono utilizzare dei modelli di dispersione che forniscono la quantità di gas presente con una concentrazione compresa tra i limiti di infiammabilità. Un metodo 'scorciatoia' per una prima approssimazione è quello di assumere che il 10% della massa di gas rilasciata si trovi nella regione infiammabile; l'effetto di tale assunzione è ovviamente molto diverso a seconda delle condizioni meteorologiche e del rilascio considerate. Viceversa l'influenza del punto di ignizione, che può giocare un ruolo importante nell'evoluzione dell'UVCE, essendo essenzialmente imprevedibile non viene solitamente considerato nei modelli utilizzati per la simulazione del fenomeno.

Complessa da determinare è poi l'energia d'esplosione di una nube di vapore, che è solo una piccola frazione dell'energia sviluppata durante la combustione, e che viene ceduta all'ambiente sotto forma di onde d'urto. Si definisce quindi **efficienza d'esplosione** (*yield factor*) il rapporto tra l'energia d'esplosione e il calore totale di combustione. L'efficienza di esplosione non è un parametro ricavabile analiticamente, ma viene valutata in maniera differente a seconda del modello di stima delle conseguenze, ad esempio considerando tutta la massa di combustibile rilasciata (approccio più semplice e comune) o solo la massa che si trova all'interno del campo d'infiammabilità (approccio più rigoroso)[60].

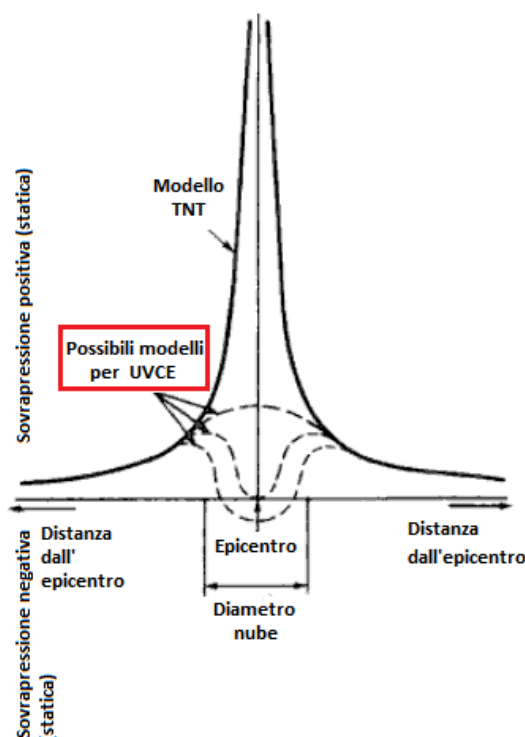


Figura 5.9: Sovrappressioni date dal modello del TNT equivalente e da da alcuni modelli possibili di UVCE (V.C.Marshall, 1976 [60])

5.2.1 Metodo del TNT equivalente

Questo metodo approssima gli effetti della deflagrazione di una nube di gas con quelli di una **detonazione ideale** di un esplosivo solido. La detonazione di un esplosivo solido viene solitamente chiamata ideale in quanto ben approssimabile con una esplosione puntiforme (cfr. Fig.5.7). L'onda d'urto viene generata dall'espansione praticamente istantanea dei gas generati dalla decomposizione dell'esplosivo solido.

Come si è già detto, in realtà i due fenomeni sono marcatamente diversi, come è evidente anche dalla Figura 5.10 che riporta l'andamento nel tempo della sovrappressione ad una data distanza per i due fenomeni esplosivi (la detonazione ha una fase positiva più breve e più intensa, e una fase negativa con un picco di pressione inferiore rispetto alla deflagrazione [71]). D'altro canto la teoria delle esplosioni ideali è ben consolidata e confermata da un gran numero di dati sperimentali di origine militare, e quindi l'utilizzo di questo semplice modello almeno come prima approssimazione è molto diffuso.

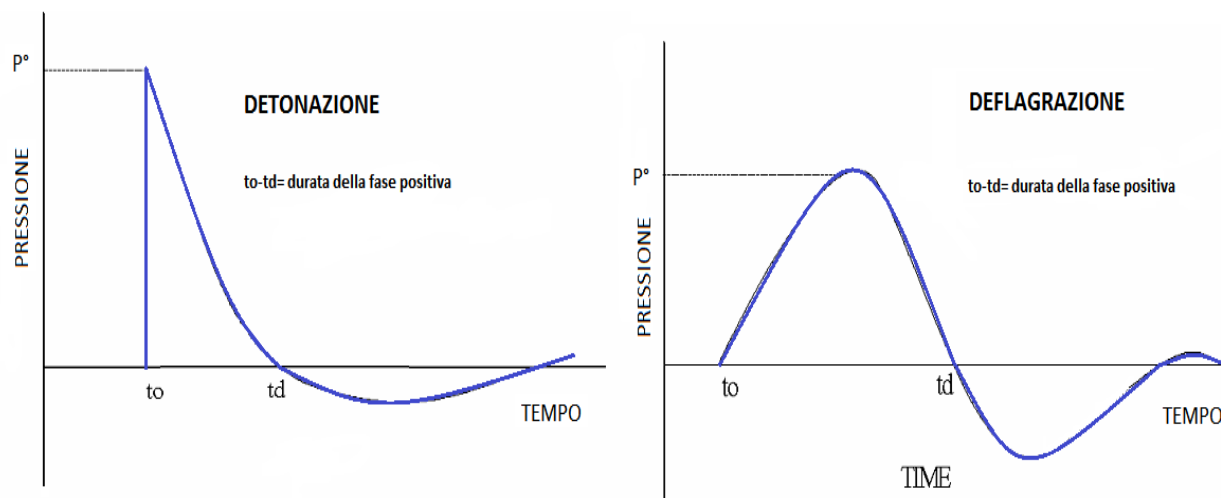


Figura 5.10: Detonazione ideale vs. Deflagrazione UVCE: la durata della fase positiva di un'onda di deflagrazione è nettamente superiore a quello di un'onda di detonazione, ad esempio per una massa di 1000 kg di idrocarburi e una velocità di fiamma di 100 m/s $t_D - t_0 = 150$ ms, contro i 40÷80 ms della detonazione [71].

Il problema del campo di pressione generato da un pistone sferico che accelera può essere formalizzato nei bilanci di materia, energia e quantità di moto a cavallo dell'onda d'urto. Assumendo che la pressione generata sia molto maggiore di quella atmosferica, che il gas segua l'equazione di stato dei gas perfetti e che l'esplosione sia ideale, le equazioni di bilancio possono essere risolte analiticamente per fornire la soluzione generale:

$$\frac{P_{shock} R_{shock}^3}{q} = \text{cost} \longrightarrow \ln(P_{shock}) = -3 \ln\left(\frac{R_{shock}}{q^{1/3}}\right) \quad (5.1)$$

da cui si vede che i valori di pressione raggiunti ad una certa distanza a seguito della detonazione di una certa quantità di esplosivo solido si devono allineare su di una retta in un grafico bilogartmico che riporti la pressione in ordinata e il rapporto $R/\sqrt[3]{q}$ in ascissa, essendo R la distanza e q la quantità di esplosivo (e, equivalentemente, l'energia rilasciata dalla sua esplosione). I dati sperimentali si allineano bene secondo questa relazione, come mostrato nella Figura 5.14.

Il metodo del TNT equivalente si basa sull'assunzione che esplosioni che coinvolgono il rilascio di una certa quantità di energia abbiano effetti analoghi, almeno nel campo lontano dal centro dell'esplosione (cioè laddove l'esplosione possa essere effettivamente considerata puntiforme). L'applicazione di questo metodo al caso di una UVCE richiede

la valutazione della **quantità di TNT equivalente**, dal punto di vista dell'energia immessa nell'esplosione, **alla massa di gas presente nella nube (W_{gas})**. Questa stima può essere effettuata con la seguente relazione:

$$W_{\text{TNT}} = \alpha \frac{W_{\text{gas}} \Delta H_{\text{comb,gas}}}{E_{\text{TNT}}} \quad [\text{kg}] \quad (5.2)$$

dove α è la sopracitata efficienza d'esplosione, $\Delta H_{\text{comb,gas}}$ (kJ/kg_{PCI}) è l'entalpia di combustione del gas e E_{TNT} è l'entalpia di decomposizione del tritolo.

Il rapporto $\Delta H_{\text{comb,gas}}/E_{\text{TNT}}$ tra le energie rilasciate dalla combustione di 1 kg di gas infiammabile e da 1 kg di TNT ($E_{\text{TNT}} = 4377 \div 4765$ kJ/kg) è pari a circa 10 per molti idrocarburi e in particolare per il GPL, che ha $\text{PCI} \approx 46000$ kJ/kg.

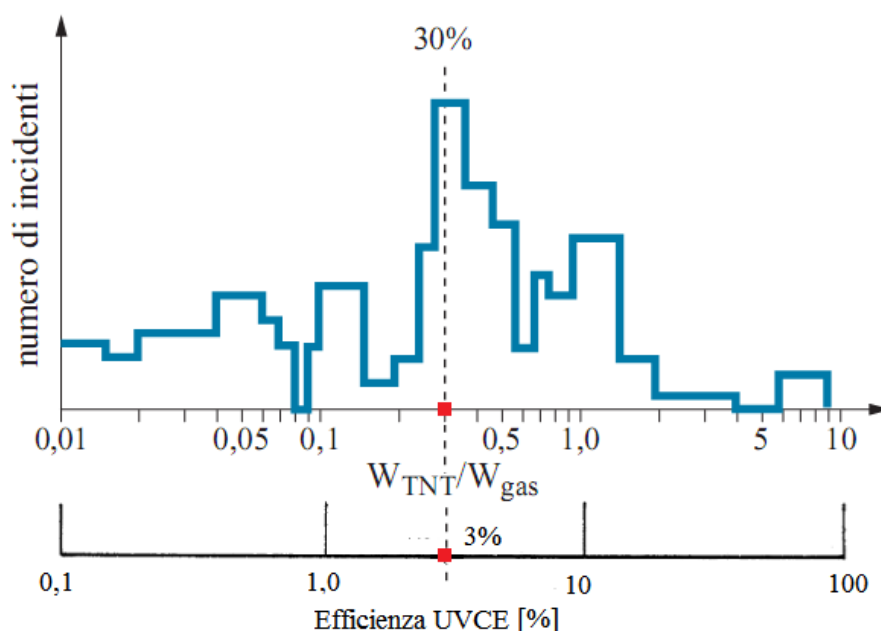


Figura 5.11: Numero di incidenti in funzione del rapporto tra la quantità di TNT equivalente e la massa di gas infiammabile rilasciata che ha originato una UVCE e relativa efficienza d'esplosione (modificata da Giesbrecht, 1988).

La principale incertezza nell'utilizzo di questo metodo risiede non tanto nella stima della massa di gas (come detto in precedenza), ma soprattutto nella stima dell'efficienza dell'esplosione, α . Quest'ultimo parametro racchiude tutte le differenze tra un'esplosione ideale e una UVCE e può essere stimato solo sulla base delle conseguenze di incidenti realmente avvenuti. Per tali incidenti (esperienze storiche) non è solitamente

disponibile la massa di gas presente all'interno dei limiti di infiammabilità e quindi il valore dell'efficienza dell'esplosione (*yield factor*) viene solitamente stimato sulla base dell'intera massa rilasciata. Purtroppo tale efficienza risente di numerosi parametri tipici del singolo episodio (condizioni meteorologiche, orografiche, del rilascio etc...) che si riflettono su una grande variabilità dell'efficienze di esplosione, come mostrato nella Fig.5.11. Questa riporta direttamente i valori del **rapporto di equivalenza**, $W_{\text{TNT}}/W_{\text{gas}}$, stimati assumendo un rapporto tra le entalpie pari a 10.

Si nota che il valore centrale della distribuzione è pari a circa 0,3 (equivalente a un efficienza dell'esplosione $\alpha \approx 3\%$), anche se valori superiori sono stati sporadicamente riscontrati. Il 97% dei casi presenta comunque un valore inferiore a 1 del rapporto di equivalenza (corrispondente a un efficienza dell'esplosione $\alpha \approx 10\%$). Se invece di considerare l'intera massa di gas rilasciato in atmosfera si effettua un calcolo di dispersione atmosferica per valutare la reale quantità di gas presente all'interno della regione di infiammabilità, da tale massa si può ricavare una massa di TNT equivalente moltiplicandola per 3 invece che per 0,3, sulla base dell'assunzione che mediamente il 10% della massa di gas rilasciata risulta essere all'interno dell'intervallo di infiammabilità.

Questo metodo non è applicabile in prossimità del centro della nube esplosiva, in quanto fornirebbe valori irrealisticamente elevati di sovrappressione⁸(cfr. Fig.5.9). Inoltre, confrontando i picchi di sovrappressione nel campo lontano, si osserva che il metodo del TNT equivalente introduce una sottostima rispetto alla deflagrazione da UVCE[60]. Si ha quindi la massima affidabilità del metodo per 0.03-0.66 bar (si veda Fig.5.13).

Una modifica solitamente utilizzata, (*modello ACMH*), è quella di considerare il massimo valore di sovrappressione raggiungibile da una UVCE pari a 1 bar e limitare così superiormente la curva base del TNT, come mostrato in Fig. 5.12, dove la quantità di esplosivo presente in ascissa è relativa al gas rilasciato. Assumendo un'efficienza di esplosione pari al 10% e un rapporto tra le energie del gas e del TNT pari a 10, le quantità di gas rilasciato e di TNT equivalente ovviamente coincidono (in altri termini, il fattore di equivalenza, $W_{\text{TNT}}/W_{\text{gas}}$, è unitario), mentre assumendo un'efficienza minore (nel caso in figura pari al 3%) la curva risulta traslata verso sinistra.

⁸la pressione di picco (positiva) sviluppata dall'esplosione di una carica di TNT è dell'ordine del mezzo milione di bar.

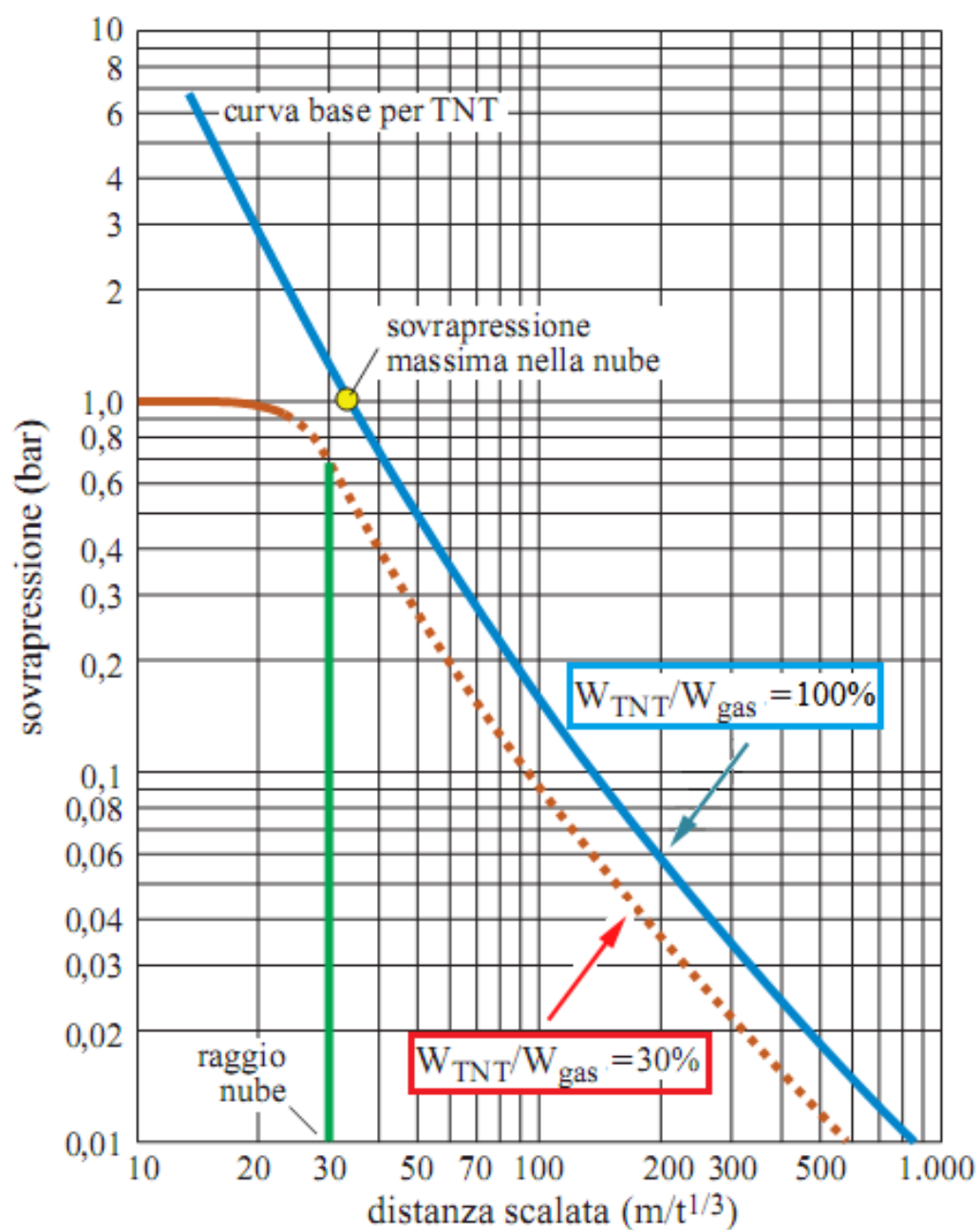


Figura 5.12: Curva di sovrapressione incidente per una UVCE in funzione della distanza scalata: correlazione ACMH (Harvey, 1979, modificata da Lees, 1996)

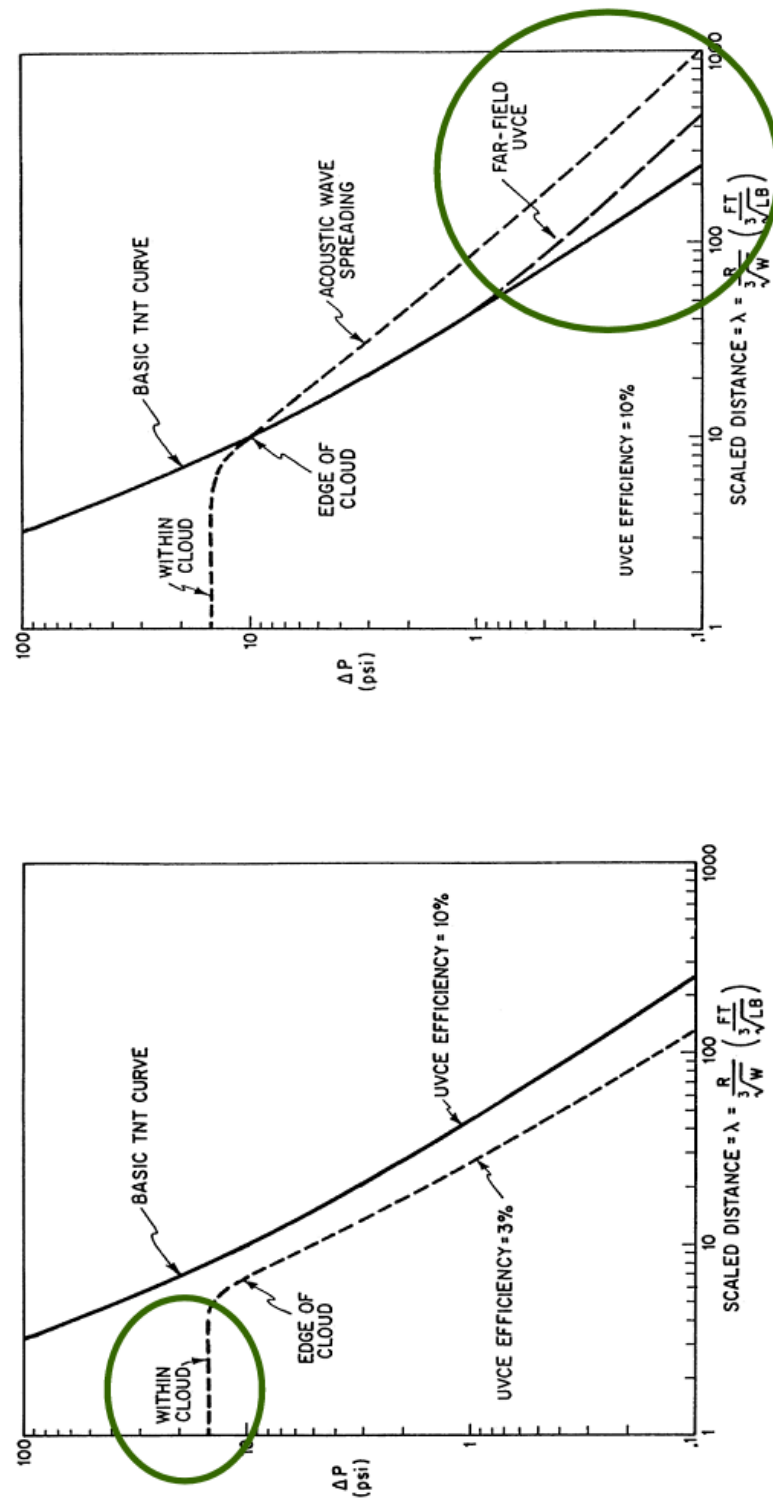


Figura 5.13: Limiti del metodo TNT. L'immagine mostra che vi sono incertezze sia nella zona vicina al centro dell'esplosione, sia nella zona lontana.

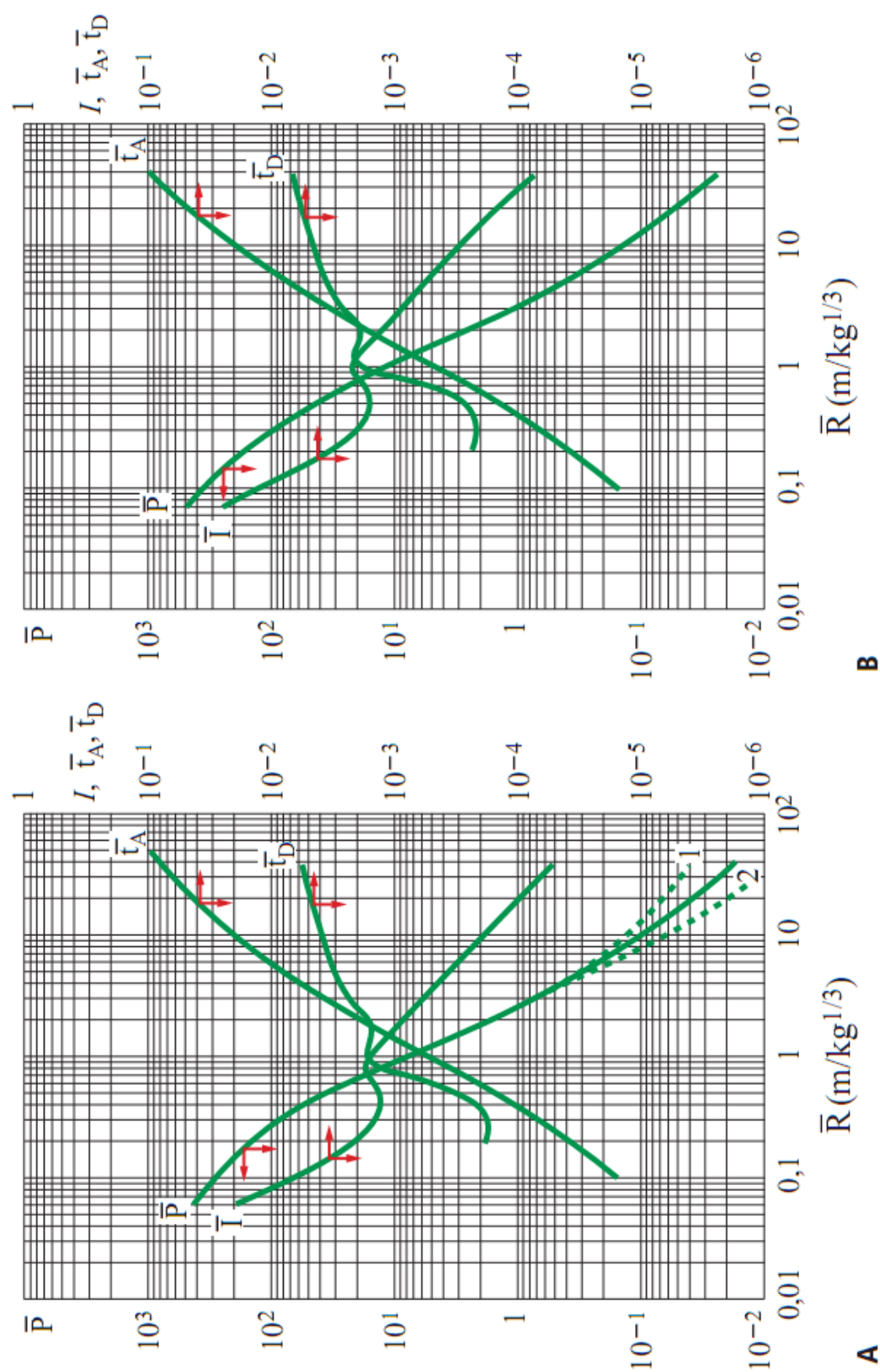


Figura 5.14: Parametri caratteristici dell'esplosione di TNT. Sovrappressione scalata, $\bar{P} = P^0/P_1$, impulso scalato, $\bar{I} = i_p/W_{\text{TNT}}^{1/3}$ ($\text{Pas/kg}^{1/3}$), tempo scalato di arrivo dell'onda d'urto, $\bar{t}_A = t_A/W_{\text{TNT}}^{1/3}$ ($\text{s/kg}^{1/3}$), e durata scalata della fase positiva dell'onda d'urto, $\bar{t}_D = t_D/W_{\text{TNT}}^{1/3}$ ($\text{s/kg}^{1/3}$), in funzione della distanza scalata, $\bar{R} = R^0/W_{\text{TNT}}^{1/3}$ ($\text{m/kg}^{1/3}$), per esplosioni di TNT. **A**, esplosioni in aria libera (simmetria sferica); **B**, esplosioni al suolo (simmetria emisferica) (modificata da Lees, 1996).

5.3 Incidenti con UVCE

Data	Luogo	Sostanza	Massa[t]	TNT eq.[t]
1939	Newark, NJ	butano		
1943	Ludwigshafen, Germany	butadiene, butilene	16,5	
1945	Los angeles, CA	butano		
1948	Ludwigshafen, Germany	dimetiletere	30	20
1949	Detroit, IL	propano, butano	1,6	
1951	Baton Rouge	HC		
1953	Campana, Argentina	benzina		
1954	Portland, OR	GPL	250m ³	
1955	Freeport, TX	etilene	0,68-1,36	
	Willmington, CA	butano		
1956	Baton Rouge, LA	butilene	10	
	North Tonawanda, NY	etilene	2,5	
1957	Sacramento, CA	GPL		
1958	Hardmore, OK	propano		
	Augusta, GA	GPL		
1959	Meldrin, GA	GPL	18	
1961	Freeport, TX	cicloesano	18	0,025
	Lake Charles, LA	butano		
1962	Berlin, NY	propano	14,3	
	Fawley, UK			
	Houston, TX	benzina		
	Ras Tanura, ARABIA SAUDITA	propano	1,1	
1963	Plaquemine, LA	etilene		0,9
1964	Jackass Flats, NW	idrogeno	0,09	0,027
	Liberal, KS	propano		1
	Orange, TX	etilene	0,18	0,27
1965	Baltimore	benzene		
	Baton Rouge, LA	cloruro etilico	19,3	135-180
	Escambia, USA	idrogeno, monossido di carbonio	0,07	0,012
	Lake Charles, LA	metano, etilene		
1966	Raunheim, FRG	metano	1-1,5	2,7
	Scotts Bluff, LA	butadiene	0,45	
1967	Lake Charles, LA	isobutilene	9	12
1968	Pernis, Netherlands	HC leggeri	55-110	20
1969	Escombreras, Spain	propano		0,012
	Fawley, UK	idrogeno, nafta	23	
	Glendora, MS	VCM		
	Houston, TX	gas naturale		
	Texas City, TX	butadiene		

La tabella prosegue a pag. 167 e 168.

La tabella degli incidenti evidenzia che il fenomeno delle UVCE non è vincolato solamente ai gas di petrolio liquefatti, ma è causato anche da altre sostanze, sia di origine fossile che non fossile, tipicamente liquidi volatili surriscaldati e gas compressi. Tuttavia è importante ricordare l'elevato rischio associato ai gas liquefatti per compressione, che risiede nella loro caratteristica di realizzare un violento flash in caso di rilascio in ambiente.

Nella tabella, riassuntiva di alcuni incidenti dal 1939 al 1991, gli spazi non completi indicano che si è formata una nube di vapore, che fortunatamente non è esplosa, ma si è incendiata (flash fire). Inoltre non sono riportate in assoluto tutti i casi di UVCE a livello mondiale, ma solamente quelli in cui il fenomeno è riconducibile in maniera certa e documentata. Spesso comunque manca anche la quantità di gas fuoriuscita (per l'impossibilità di stimare la reale quantità). Dalla tabella si nota inoltre che a partire dalla fine degli anni sessanta il fenomeno delle UVCE è aumentato notevolmente, con picchi di 25 incidenti in un anno⁹.

La tabella inoltre, riportando le tonnellate di TNT equivalente, dà un'indicazione sulla violenza delle UVCE. Basti ricordare l'incidente di Flixborough (1974, UK), uno dei più documentati, nel quale a seguito di una fuoriuscita di cicloesano (da una tubazione che metteva in comunicazione più reattori) si formò una nuvola di vapore, che detonò con la forza di 16 ÷ 18 tonnellate di TNT equivalente (sulla massa equivalente non vi è accordo tra gli studiosi). Tale esplosione ebbe un effetto distruttivo sulle strutture ad essa adiacenti ed innescò un tremendo incendio, che durò per più di una settimana (nell'incidente persero la vita 28 persone).

Nonostante la sua gravità, Flixborough non è l'incidente con l'esplosione più intensa mai verificatasi, né quello con il maggior numero di vittime. In Germania nel 1948, nello stabilimento petrolchimico di Ludwigschafen, a seguito di una esplosione di una nube di vapore di dimetiletere, dal potere detonante di 20 t di TNT equivalente, persero la vita 207 persone. Inoltre l'UVCE più violenta, storicamente, si verificò ad Ufa in Russia, ove l'esplosione di una nube di gas naturale liquefatto raggiunse l'impressionante forza di 10000 t di TNT equivalente.

Si cita inoltre il caso di Beek, in Olanda, dove nel 1975 una fuga di propilene, dovuta ad una rottura per fragilità di un fusto di alimentazione, diede origine ad una nube di vapore che esplose uccidendo 14 persone e provocando seri danni alle strutture circostanti.

A tutt'oggi (Buncefield, UK, 2005) tali incidenti continuano a verificarsi.

⁹Probabilmente in ragione del fatto che la richiesta di combustibili o di sostanze chimiche, con lo sviluppo mondiale, è aumentata nel tempo.

1970	Big Springs TX			
	Linden, NJ	idrogeno, HC	114	45
	Port Hudson, MO	propano	27-55	45
1971	Baton Rouge, La	etilene	3,6	0,45
	Houston, TX	butadiene	12	
	Longview, TX	etilene	0,45	0,5
1972	East Louis, IL	propilene	53,5	2,5
1973	Gladbeck, FRG			
	Noatsu, JAPAN	VCM	4,2	0,2
	St-Amand-les-Eaux, FRANCE			
	Tokuyama, JAPAN	etilene		
1974	Beaumont, TX	isoprene	7,6	0,9
	Climanx, TX	VCM	110	
	Cologne, FRG	VCM		
	Decatur, IL	isobutano	69	20-125
	Fawley, UK	etilene	0,9-2,7	
	Flixborough, UK	cicloesano	36	18
	Holly Hill, FL	propano		
	Houston, TX	butadiene	<80	20-57
	Petal, MO	butano		
	Roumania	etilene		
	Zaluzi, cecoslovacchia	etilene		
1975	Antwerp, BELGIUM	etilene	2,5	
	Beek, NETHERLANDS	propilene	5,5	2,2
	Cologne, FRG	idrogeno, nafta		
	Eagle Pass, TX	GPL	18,2	
	Rosendaal, NETHERLANDS	benzina	25-50	1
	Watson, CA	idrogeno	0,3	0,018
1976	Longview, TX	etilene		
	Los angeles, CA			
1977	Baytown, TX	benzina	300	
	Brindisi, ITALY	HC leggeri		
	Dallas, TX	isobutano	68,2	1,6
	Port Arthur, TX	propano		

1978	Abquaiq, ARABIA SAUDITA	metano, GPL		24
	Denver, CO	propano		
	Immingham, UK	gas di sintesi	0,2-0,3	0,03
	Pitesti, ROMANIA	propano, propilene		
	Poblado Tres, MEXICO	gas naturale		
1979	Texas City, TX	propano	3,1	0,9
	Torrance, CA	C3-C4		
	Ypsilanti, MI	propano		
1980	Borger, TX	HCS leggero		
	Enschede, NETHERLANDS	propano	0,11	
	New Castle, DE	etano, propilene	12,7	
1981	CECOSLOVACCHIA	gas di sintesi		
	Gothenburg, SWEDEN	propano	30-40m ³	
1982	Philadelphia, PA			
1983	Port Newark, NJ	benzina		
1984	Romeoville, IL	propano		
	Sarnia, ONTARIO	idrogeno	0,03	0,91
1985	Cologne, FRG	etilene		4,1
	Edmonton, ALBERTA	gas naturale liquido	4900 m ³	
	Lake Charles, LA	propano		
	Mont Belview, TX	etano, propano		
1987	Pampa, TX	acido acetico, butano		
	Ras Tanura, ARABIA SAUDITA	propano	300 m ³	0,9
1988	Beek, NETHERLANDS	etilene		
1988	Norco, LA	HC leggeri	9	
	Rafness, NORWAY	VCM	25	
1989	Baton Rouge, LA	etano, propano, butano		
	Minnebeavo, USSR	propano		
	Padadena, TX	isobutano	37,8	
	Ufa, USSR	gas naturale liquefatto		10000
1990	Cincinnati, OH	xilene, solvente		
	Maharashtra, BOMBAY	etano, propano		
	Porto de Leixhass, PORTUGAL	propano		
	Tomsk, USSR	gas		
1991	Kensington, GA	butadiene		
	Pajaritos, MEXICO	propano		
	Seadrift, TX	ossido di etilene		

Tabella 5.3: Alcuni incidenti coinvolgenti incendi o esplosioni di nubi di vapore.

5.3.1 Analisi empirica

In generale l'analisi empirica, basata sugli incidenti con innesco di nubi di vapore, ha permesso di risolvere alcuni interrogativi sulle UVCE quali:

- esistenza di un valore di soglia della massa di materiale rilasciato, al di sotto del quale non avviene l'esplosione;
- distanza percorsa dalla nube prima dell'ignizione (*drift*);
- ritardo temporale nell'innesco della nube;
- probabilità che si verifichi un'esplosione piuttosto che un flash fire;
- influenza della densità del combustibile rilasciato.

Wiekema nel 1982 condusse un'analisi sistematica sulle esplosioni di nubi di vapore basata su un totale di 165 incidenti documentati in letteratura, nei quali furono coinvolte nubi di vapore innescate. Tali incidenti si verificarono nel periodo 1920-1980 e la loro distribuzione temporale è riportata in Fig. 5.15. I relativi report, i documenti e le descrizioni furono analizzati con l'ausilio di selezionate caratteristiche empiriche, in modo da classificare ogni incidente nella maniera più accurata possibile [72]. Tali caratteristiche costitutive definite da Wiekema sono: massa, reattività, sorgente d'ignizione, trasporto (*drift*), ritardo nell'accensione e confinamento.

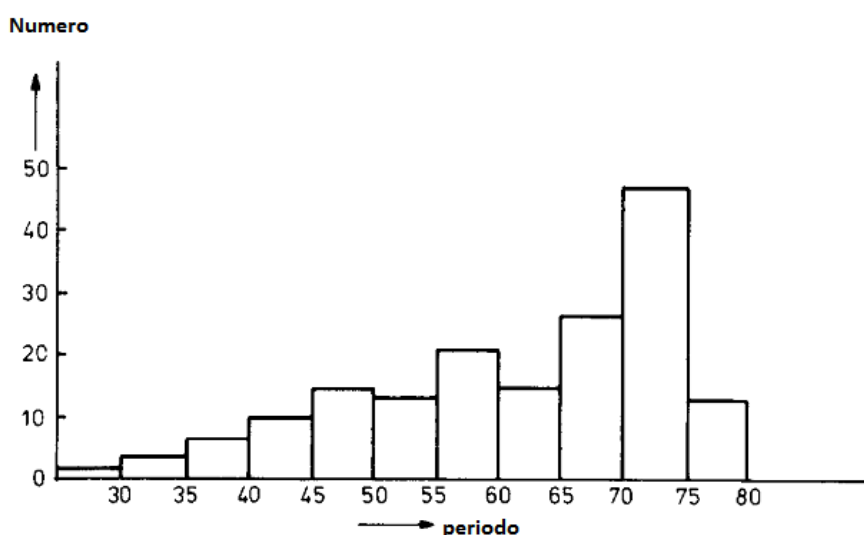


Figura 5.15: Numero di nubi di vapore ignite in un intervallo temporale di cinque anni

Nel seguito si riportano i risultati dell'analisi di Wiekema, confrontandoli, ove possibile, con la casistica incidentale riportata in Tabella 5.3 [60]. Lo scopo è quello di definire dei trend sistematici e delle condizioni generali che caratterizzino l'ignizione di una nube di vapore e le relative conseguenze.

E' infine importante precisare che un'analisi del genere è limitata nell'affidabilità da due condizioni al contorno:

1. l'incompletezza nella descrizione degli incidenti;
2. l'incompletezza nel numero degli incidenti (non tutti sono reperibili in letteratura).

REATTIVITA' DEL MATERIALE RILASCIATO

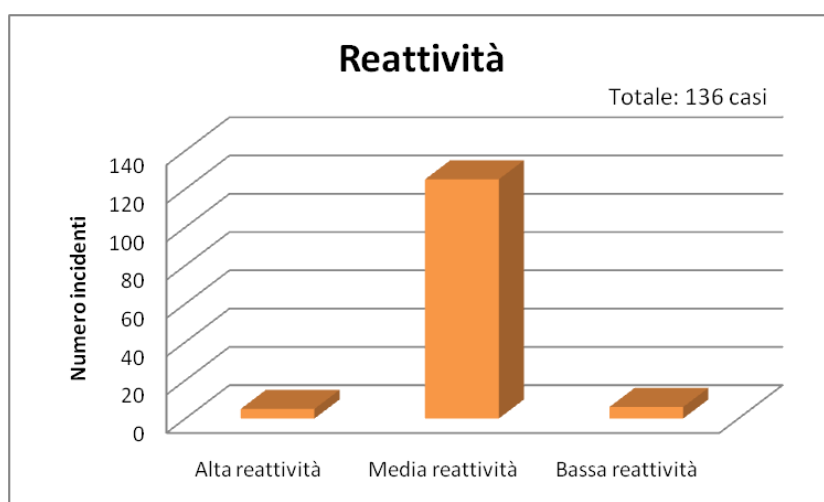


Figura 5.16: Incidenti con nubi di vapore e reattività della sostanza coinvolta, (modificata da Lees [60].)

E' noto che gas diversi reagiscono in maniera differente, pur trovandosi nelle medesime condizioni, in ambienti confinati. Lo stesso vale per le nubi di vapore. I gas che le compongono vengono suddivisi in tre gruppi: alta, media e bassa reattività (cfr. Tabella 5.4). Si noti che con **reattività** della sostanza coinvolta Wiekema intende la sensibilità all'accelerazione del fronte di fiamma [73]. Si considerino a titolo d'esempio il metano (bassa reattività), il propano (media reattività) e l'acetilene (alta reattività). La reattività della sostanza dipende dunque dalle cinetiche di reazione. Il metano ha una molecola molto stabile, la più stabile di tutte le paraffine, mentre il propano (paraffina le cui molecole hanno una catena di tre atomi di carbonio) reagisce più facilmente, e infine l'acetilene ha un triplo legame, che si rompe molto facilmente, il che lo rende molto più

reattivo. Dall'analisi statistica risulta che la maggioranza dei gas e dei liquidi che danno luogo a nubi di vapore, che si incendiano o esplodono, appartengono al gruppo a media reattività, come mostrato in Fig. 5.16.

Reattività	Composti
Bassa	ammoniaca 1,3-dicloropropene epicloridrina metano monossido di carbonio piombo tetraetile
Media	acetaldeide acetonitrile acido formico acrilonitrile 1,3-butadiene n-butano 1-butene cloruro di vinile dietilammina dimetilammina etano etene propano propene
Alta	ossido di etilene acetilene acido solfidrico formaldeide idrogeno

Tabella 5.4: Classificazione di alcuni composti secondo il metodo di Wiekema, (tratta da TNO Yellow Book)

E' importante precisare che la Figura 5.16, tratta dall'analisi incidentale condotta da Wiekema, è relativa alle nubi di vapore infiammabile in generale e non esclusivamente

alle nubi esplose. Nel trend sono quindi conteggiati anche i flash fire. E' inoltre da sottolineare che il grafico ha una mera rilevanza statistica, dato che è appurato (cfr. Tabella 5.3) che la nube può esplodere qualunque sia la sostanza infiammabile che la forma, sia essa altamente (idrogeno) o poco (metano) reattiva. Ciò che è determinante è la quantità rilasciata in ambiente: tanto più la sostanza è reattiva, minore è la quantità minima necessaria all'esplosione; pertanto anche per rilasci di entità modeste (30 kg di idrogeno, Sarnia, Ontario, 1984) si possono registrare sovrappressioni importanti ($W_{TNT} = 0,91$ t), perchè più il materiale è reattivo più la fiamma tende ad accelerare in seguito all' innesco.

MASSA DI MATERIALE RILASCIATO

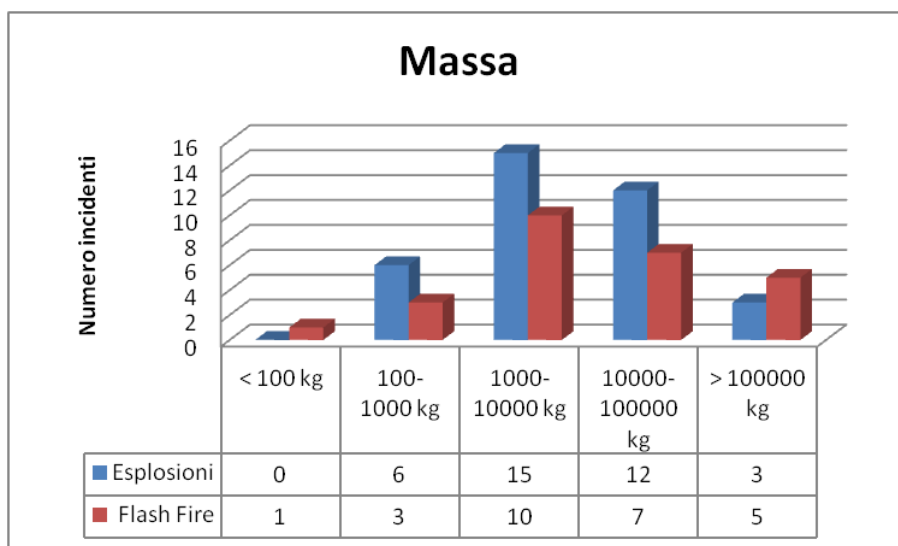


Figura 5.17: Massa coinvolta in alcuni incidenti con nubi di vapore di sostanze di media reattività (Wiekema [72].)

Come già si è detto perché una nube possa deflagrare è necessario che la fiamma acceleri, e quindi che la nube sia abbastanza grande da dare il tempo ai meccanismi di accelerazione del fronte di fiamma di diventare efficaci. In letteratura il valore di soglia minimo di materiale infiammabile rilasciato è indicato da molti autori¹⁰ come pari a 1 t, eccetto composti particolarmente reattivi (idrogeno, acetilene, ossido di etilene etc...) per cui bastano alcune decine di kg per dare luogo a una UVCE [65].

¹⁰Rota [70] e Marshall (1976)

E' importante precisare che secondo Kletz non esiste nessuna base teorica legittima per definire un valore di soglia della quantità di sostanza coinvolta (al di sotto del quale non vi è possibilità di esplosione). Tuttavia egli riconosce che la probabilità che si verifichi un'esplosione decresce significativamente se la quantità di sostanza rilasciata è piccola. Kletz suggerisce che in presenza di 10 t di vapore, la probabilità d'esplosione è di un caso su 10, laddove se la quantità di vapore è pari a 1 t o meno la probabilità che abbia luogo una UVCE è dell'ordine di un caso su 100 [60] .

Tornando all'analisi di Wiekema e considerando le sole sostanze a media reattività, tra le quali il GPL, il valore di soglia viene abbassato al quintale, come riportato in Tabella 5.8 e Fig. 5.19, ovvero per $M < 100$ kg si ha solo incendio di nube (flash fire). La Tabella 5.8 mostra che sull'intervallo 1 - 100 t la quantità di materiale coinvolto non influenza significativamente la formazione di onde di pressione in seguito all'innescio. Tuttavia per rilasci superiori alle 100 t sembrerebbe che i flash fires abbiano un'incidenza maggiore rispetto alle UVCE [72].

Infine analizzando la Tabella 5.3 si trovano dei risultati conformi allo studio di Wiekema (cfr. Fig.5.18 e Fig. 5.19). Si nota che ben 12 incidenti su 51 (~ 24%) videro coinvolta una massa di sostanza infiammabile inferiore alla tonnellata; di questi 12 incidenti 5 risultarono essere incendi di nube (flash fire) e 7 UVCE. E' però importante notare che queste esplosioni in ambiente non confinato con $M < 1000$ kg interessarono in 5 casi su 7 idrogeno e gas di sintesi, ovvero sostanze ritenute altamente reattive. Negli altri due casi furono coinvolti invece 180 kg di etilene (Orange, TX, 1964) e 555 kg di propano (300m^3 , Ras Tanura, Arabia Saudita, 1987).

incidenti totali di cui si ha una stima della fuoriuscita	51
incidenti con fuoriuscita < di 1 tonnellata equivalente	12
incidenti con fuoriuscita compresa tra 1 e 10 tonnellate equivalenti	17
incidenti con fuoriuscita compresa tra 10 e 100 tonnellate equivalenti	18
incidenti con fuoriuscita maggiore di 100 tonnellate equivalenti	4

Tabella 5.5: Incidenti (UVCE + flash fire) relativi alla Tabella 5.3

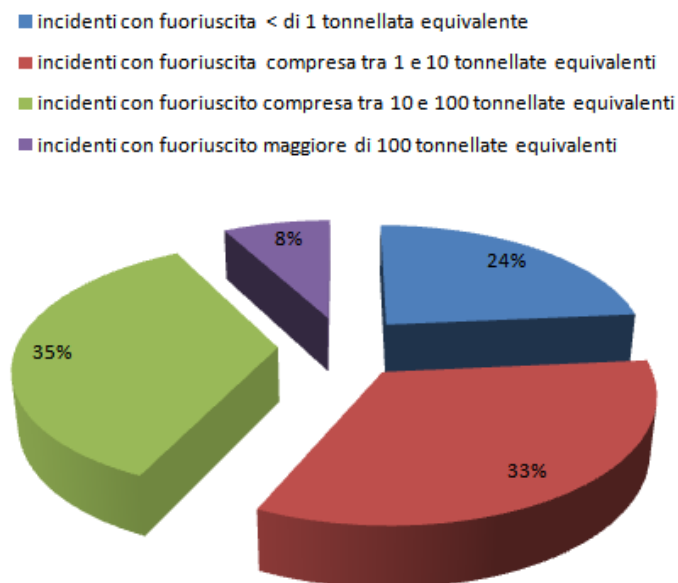


Figura 5.18: Suddivisione degli incidenti (UVCE + flash fire) di Tabella 5.3 per quantità di sostanza rilasciata

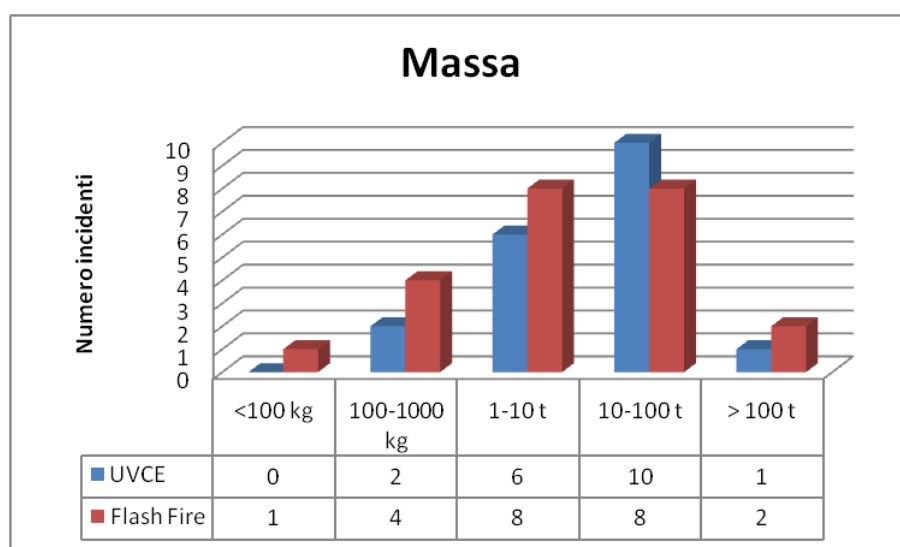


Figura 5.19: Massa coinvolta in 42 incidenti con nubi di vapore di sostanze di media reattività come il GPL (da Tabella 5.3). Sono stati dunque esclusi dal conteggio idrogeno e gas di sintesi (altamente reattivi) e il metano (poco reattivo).

DISTANZA PERCORSO DALLA NUBE

La distanza percorsa, prima dell'innesco, da una nube di vapore infiammabile a partire dal punto di rilascio (*drift*) è fortemente influenzata dalle contingenze locali (turbolenza, ventosità) e dalla densità della sostanza coinvolta. Il drift della nube determina il centro dell'esplosione e l'intensità dell'onda di pressione in campo vicino (ma ha meno influenza sull'intensità della sovrappressione in campo lontano) [60].

Nel merito della sua analisi, Wiekema riconobbe nella distanza percorsa dall'estremità frontale della nube di vapore prima dell'innesco un parametro significativo del problema UVCE - flash fire (cfr. Tabella 5.8 e Fig. 5.20). Dal suo studio emerge che degli 87 incidenti (di cui era nota la distanza percorsa dalla nube prima dell'ignizione) più del 60% trovarono innesco entro 100 m dal punto di rilascio. Solo nel 2% dei casi la nube di vapore percorse più di un chilometro prima dell'ignizione [72].

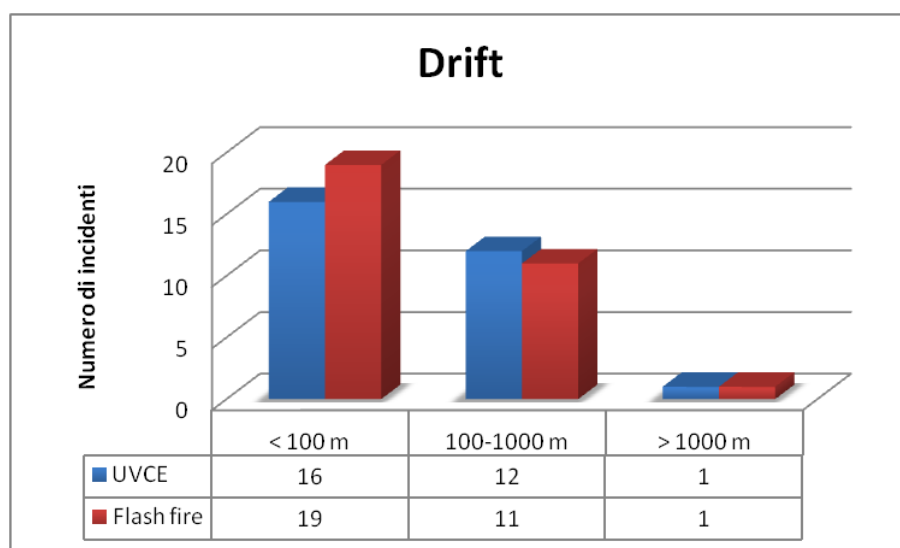


Figura 5.20: Distanza percorsa dalla nube di vapore prima dell'innesco in alcuni incidenti con sostanze di media reattività (Wiekema [72]).

Considerando le sole UVCE, Kletz afferma che in qualunque area industriale o urbana è molto improbabile che la distanza percorsa dall'estremità della nube prima dell'innesco sia ragguardevole. Egli sostiene che per la maggior parte dei calcoli relativi alle UVCE si può assumere l'ipotesi semplificativa di drift nullo, tuttavia riporta una distanza di 100 m in un incidente su 5. In aree aperte, caratterizzate da poche sorgenti d'ignizione, la nube tende a trasportarsi molto più lontano. Ad esempio nell'esplosione di Port Hudson (Franklin County, Missouri, 1970) la nube di propano percorse 535,5 m (1500 ft) in

un lungo pennacchio prima dell'innesco. Inoltre J.B. James (1947-48), analizzando 81 perdite accidentali da carri-cisterna, riporta che nel 58% dei casi la relativa nube infiammabile abbia trovato innesco entro i 18 m (50 ft), mentre nel 76% dei casi entro i 36 m (100 ft), e che tutte le nubi che trovarono innesco lo fecero entro ~ 100 m (300 ft) [60].

RITARDO NELL'INNESCO

Si tratta di un parametro correlato al precedente. Strehlow (1973 [74]) riferisce di un caso di UVCE con ritardo di 15 minuti nell'innesco; è evidente che in un tempo così lungo si può accumulare una gran quantità di materiale infiammabile. L'esplosione che ne segue può essere di proporzioni rilevanti, ma può esserlo anche se il ritardo nella ignizione è molto minore. Basti pensare che a Flixborough passarono dai 30 ai 90 s (in letteratura sono ampiamente citati 45 s) tra il rilascio e la UVCE.

Si noti che sono molti gli incidenti, riportati in letteratura, in cui la nube si è formata da un getto turbolento (e.g. frattura in una tubazione, cfr. pag. 113), come a Flixborough. In tal caso la nube può raggiungere una dimensione d'equilibrio entro 10-20 s [60]. Una volta che tale stato stazionario è stato raggiunto, la massa di materiale nella nube disponibile per la combustione non aumenta più, anche qualora si verifichi un apprezzabile ritardo nell'innesco.

Inoltre Wiekema nella sua indagine arriva a concludere che un piccolo ritardo nell'innesco (entro un minuto) innalza la probabilità d'esplosione [72]. Infatti, come già si è detto, se l'innesco non è immediato la nube ha tempo di disperdersi e quindi di creare una quantità significativa di miscela gas-aria con concentrazione interna al campo d'infiammabilità. A tal punto la possibilità che avvenga un flash fire o una UVCE dipende dalla quantità di materiale infiammabile rilasciato e dalla presenza o meno di ostacoli e congestionamento.

SITO DI RILASCIO

La conformazione dell'area in cui avviene il rilascio è determinante per il verificarsi o meno di una UVCE. Wiekema definisce, per gli scopi della sua analisi, ambiente non confinato un ambiente in cui non vi siano pareti, abitazioni, strutture o simili investite dalla nube di vapore al momento dell'ignizione. Di contro considera ogni altra situazione come ambiente confinato. Egli conclude, conformemente a quanto detto in precedenza in questo capitolo, che in assenza di oggetti o ostacoli non si registra alcuna esplosione

della nube di vapore, e che quindi la presenza di di una qualche forma di confinamento o congestionamento è una condizione necessaria perchè si verifichi una UVCE. Dalla Tabella 5.8 (e dai paragrafi precedenti) si deduce inoltre che ovviamente la presenza di ostacoli e confinamento non è l'unico requisito perchè vi sia esplosione; infatti in molti incidenti con situazione di semi-confinamento si verificò un flash fire (cfr. 5.21).

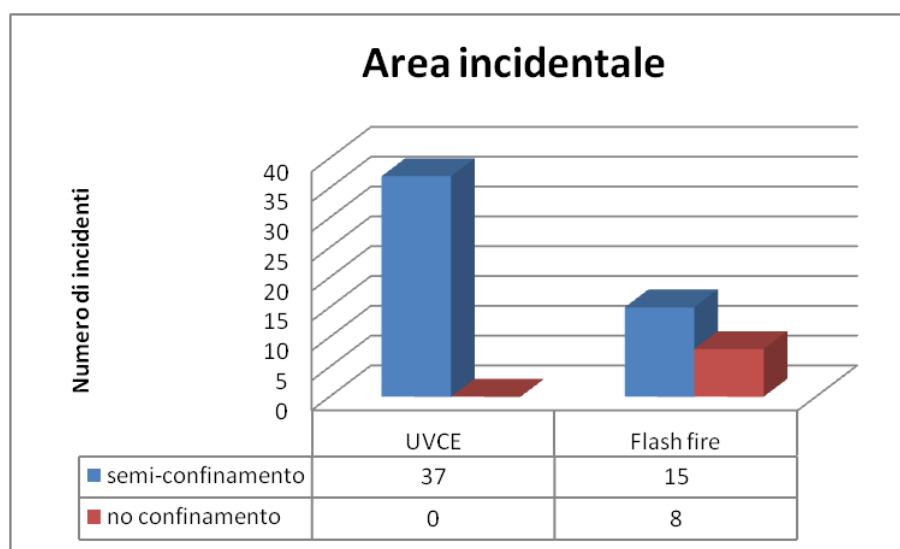


Figura 5.21: Caratteristiche del luogo di incidenti con sostanze di media reattività coinvolte (Wiekema [72]).

DENSITA' DEL MATERIALE RILASCIATO

Sulla base della Tabella 5.3 (tratta dal Lees [60]) si è infine cercato di verificare l'incidenza della densità del materiale rilasciato in ambiente sulla probabilità che si verifichi un'eplosione in ambiente non confinato.

Incidenti totali	103
Incidenti con composti di densità maggiore dell'aria	73
incidenti con composti di densità minore dell'aria	17
incidenti con composti di densità paragonabile a quella dell'aria	13

Tabella 5.6: Influenza statistica della densità della sostanza rilasciata sull'incidentalità (UVCE+flash fire)

Come si può notare dal diagramma a torta in Fig.5.22 e dalla Tabella 5.6, la maggioranza delle esplosioni di nube di vapore e dei flash fire è stata generata da gas più pesanti

dell'aria, ovvero da gas che tendono a serpeggiare lungo il terreno, dando luogo a nubi schiacciate a frittella (*pancake shaped*).

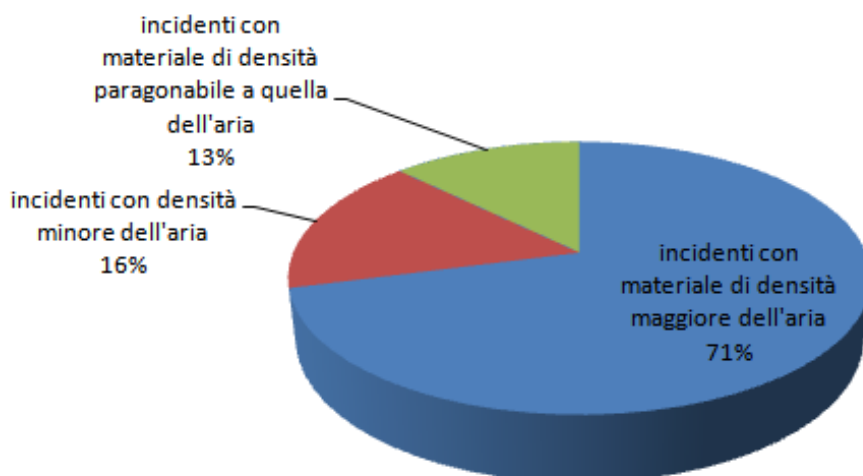


Figura 5.22: Distribuzione incidenti per densità della sostanza infiammabile rilasciata (da Tabella 5.3).

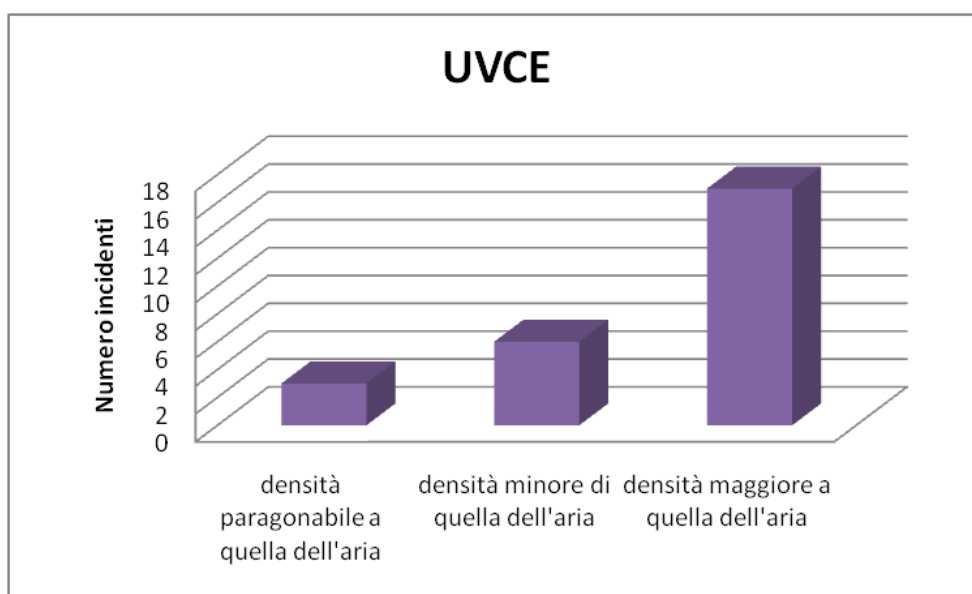


Figura 5.23: Incidenza della densità della sostanza rilasciata sul numero di UVCE (da Tabella 5.3).

Se si considerano i soli incidenti (51) di cui è nota l'entità del rilascio risultano 26 UVCE. Dividendo queste ultime per densità del materiale rilasciato, emerge quanto schematizzato in Fig. 5.23, ovvero che la maggior parte delle esplosioni (~ 65%) ha interessato

sostanze più pesanti dell'aria. La ragione dell'incremento nel rischio di UVCE in presenza di un materiale più pesante dell'aria risiede essenzialmente nel fatto che, mantenendosi in prossimità del terreno, la nube va incontro più facilmente a zone congestionate e/o a confinamento parziale, indispensabili per l'accelerazione del fronte di fiamma (e conseguentemente all'esplosione della nube innescata).

	Densità di vapore relativa (aria = 1)
<i>butano</i>	2,1
<i>isobutilene</i>	1,94
<i>butadiene</i>	1,9
<i>nafta</i>	4
<i>dimetiletere</i>	1,6
<i>VCM</i>	2,2
<i>propano</i>	1,6
<i>gas naturale</i>	0,61
<i>propilene</i>	1,5
<i>benzina</i>	3-4
<i>isoprene</i>	2,4
<i>GPL</i>	2,0
<i>isobutano</i>	2,0
<i>etilene</i>	0,98
<i>gas di sintesi</i>	0,50
<i>cicloesano</i>	2,9
<i>idrogeno</i>	0,07
<i>esano</i>	3,0
<i>benzene</i>	2,7
<i>etano</i>	1,05
<i>cloruro etanologico</i>	2,7
<i>acido acetico</i>	2,1
<i>monossido di carbonio</i>	0,97
<i>xilene</i>	3,7
<i>metano</i>	0,6
<i>ossido di etilene</i>	1,5

Tabella 5.7: Densità delle sostanze (allo stato gassoso) coinvolte negli incidenti con UVCE di Tabella 5.3.

Va tuttavia precisato che gli incidenti considerati (1939-1991) coinvolgenti i gas pesanti (GPL, butano, propano, benzene) si sono verificati nell'ambito di raffinerie e impianti di processo. Le procedure di distillazione in colonna, trasporto e stoccaggio comportano un aumento notevole delle probabilità di incidenti, poiché affette da errore umano.

Per quanto riguarda invece i gas più leggeri dell'aria come il metano o il gas naturale, essi sono per la maggior parte trasportati in metanodotti (anche se ultimamente sta prendendo sempre più piede il trasporto di metano liquefatto via nave), quindi non solo non si rende necessario lo stoccaggio, ma per definizione stessa di gas naturale essi non vengono lavorati in alcun modo, se non attraverso processi di desolforazione e odorizzazione. Pertanto l'incidentalità può essere statisticamente più esigua (rispetto a quella relativa ai gas più pesanti dell'aria) anche per questa ragione.

Concludendo, si può dire che gli incidenti verificatisi con gas più leggeri dell'aria sono una piccola percentuale sul totale (16%), probabilmente non solo perché il metano, essendo più leggero dell'aria, tende a salire e quindi a disperdersi in atmosfera, ma anche perché è difficile che vi siano grosse fuoriuscite del medesimo in ragione delle modalità di lavorazione e trasporto. Inoltre l'uso del metano è tipico solo di alcuni Paesi, ovvero non tutti utilizzano il metano come fonte di energia principale, mentre le raffinerie che processano il petrolio e i suoi derivati (come GPL e benzene che spesso danno luogo ad UVCE se rilasciati in quantità sufficiente) sono presenti praticamente in tutti i Paesi del mondo.

5.3.2 Conclusioni sul confronto UVCE - Flash Fire

Dai paragrafi precedenti si evince che la probabilità che l'ignizione (in ambiente aperto) di una nube di vapore infiammabile causi un'esplosione piuttosto che un flash fire dipende da un esteso numero di parametri. In conclusione:

- la reattività della sostanza infiammabile influenza la quantità minima necessaria all'esplosione (al di sotto della quale si ha solo flash fire);
- tale quantità vale ~ 10 kg per sostanze molto reattive (e.g. idrogeno, acetilene) e 1000 kg per sostanze mediamente reattive (e.g. GPL, propano), ovvero con questi valori di soglia la probabilità che si verifichi una UVCE è $\leq 1\%$;
- una nube di vapore veramente non confinata e ostruita da ostacoli, se innescata da una debole sorgente di ignizione, produce solo un flash fire (piccoli incre-

menti di pressione), pertanto un semi-confinamento (alberi, strutture, abitazioni) è indispensabile perchè una UVCE abbia luogo;

- l'innesco non deve essere immediato (almeno qualche decina di secondi), affinché vi sia miscelazione combustibile - comburente con dosatura entro i limiti d'infiammabilità; altrimenti, in seguito a innesco immediato, si ha propagazione di una fiamma diffusiva (più lenta di una premiscelata) e quindi la nube non esplode, ma avviene un flash fire.

		Esplosioni	Flash Fire
Totale		62	53
Massa	$< 10^2$ kg	0 (3%)	1 (4%)
	$10^2 - 10^3$ kg	6 (14%)	3 (12%)
	$10^3 - 10^4$ kg	15 (43%)	10 (38 %)
	$10^4 - 10^5$ kg	12 (31%)	7 (27%)
	$> 10^5$ kg	3 (9%)	5 (19%)
Drift	$< 10^2$ m	16 (55%)	19 (61%)
	$10^2 - 10^3$ m	12 (41%)	11 (35%)
	$> 10^3$ m	1 (4%)	1 (4%)
Sito	semi-confinato	37 (100%)	15 (65%)
	non confinato	0 (0%)	8 (35%)
Ritardo	< 1 min	5 (25%)	3 (14%)
	1-5 min	7 (37%)	10 (48%)
	6-15 min	5 (25%)	3 (14%)
	16-30 min	3 (16%)	0 (0%)
	> 30 min	0 (0%)	5 (24 %)

Tabella 5.8: Numero e relativa percentuale di incidenti per ciascuna caratteristica empirica rilevante nell'ambito di UVCE e flash fire di materiali di media reattività (modificata da Wiekema [72]).

5.4 Disastro di Flixborough (1974)



L'esplosione di Flixborough è stata la più grande mai avvenuta in tempo di pace nel Regno Unito fino a quella di Buncefield nel 2005. Ci furono 28 vittime e la forza della esplosione, unita all'incendio che si sviluppò, distrusse completamente lo stabilimento di proprietà della NYPRO. A seguito di ciò fu nominata una commissione di inchiesta con lo scopo di determinare le cause del disastro e di reperire tutte le informazioni utili all'analisi dei rischi da incidente rilevante. I periti accertarono che l'entità del rilascio di cicloesano fu di circa 40-60 tonnellate, sufficienti a generare una gigantesca nube di vapore dal potere detonante di circa 18 tonnellate di tritolo equivalente [75].

5.4.1 Scenario incidentale

Il primo giugno 1974 alle 15:53 ci fu un'esplosione con conseguente incendio nello stabilimento della NYPRO, situato vicino a Flixborough (North Lincolnshire, Inghilterra, UK). Lo stabilimento era situato sulla riva est del fiume Trent, un affluente del fiume Humber (circa 50 km a ovest dal porto di Grimsby).

Nell'impianto di Flixborough veniva prodotto nylon e il processo prevedeva l'ossidazione del cicloesano in aria, in un treno di sei reattori.

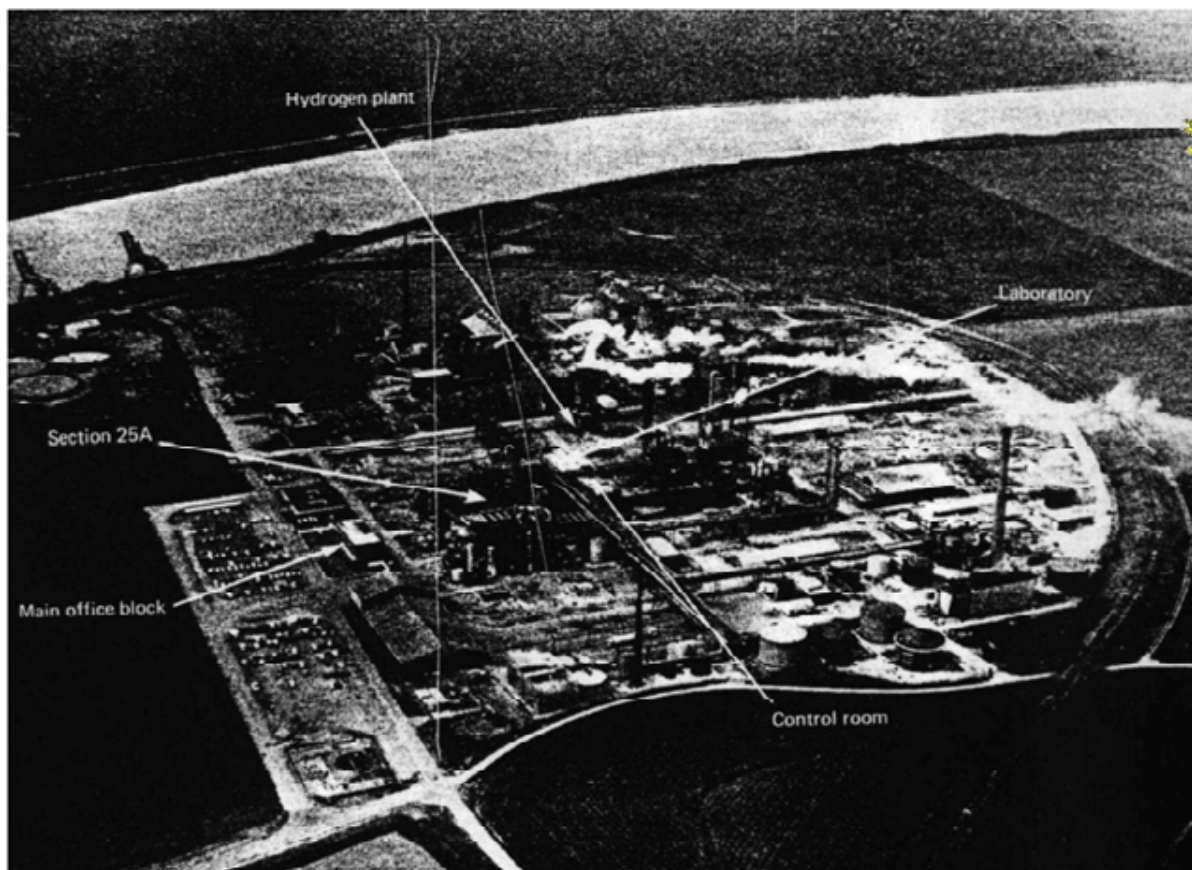


Figura 5.24: Fotografia dell'alto dello stabilimento della NYPRO

Una fuga accidentale di cicloesano liquido ¹¹ in condizione di surriscaldamento (mantenuto ad una pressione di 0,96 MPa e a una temperatura di 155°C), sfociò in una tremenda esplosione della nube di vapore formata (UVCE).

L'esplosione, che fece 28 vittime e 36 feriti, rase al suolo oltre 97000 m² di stabilimento e causò anche ingenti danni alla comunità locale, in quanto vennero danneggiate molte strutture e infrastrutture che non appartenevano all'area di processo (1836 case e 167 attività commerciali subirono danni da sovrappressione). L'esplosione raggiunse i 24-45 m d'altezza e venne avvertita fino ad Anlaby, nella contea di Hull a circa 32 km di distanza dall'epicentro.

¹¹ Il cicloesano (C₆H₁₂) è un liquido incolore, simile per quanto riguarda le sue proprietà alla benzina (flash point - 20°C, temperatura di auto ignizione 245°C, limiti d'infiammabilità in aria 1,3-7,8 % vol.) e ha punto di bolla atmosferico a 81°C.

che risultò essere la sorgente della perdita accidentale, era allineato secondo l'asse nord-sud della suddetta sezione (cfr. Fig. 5.26 e Fig. 5.25).

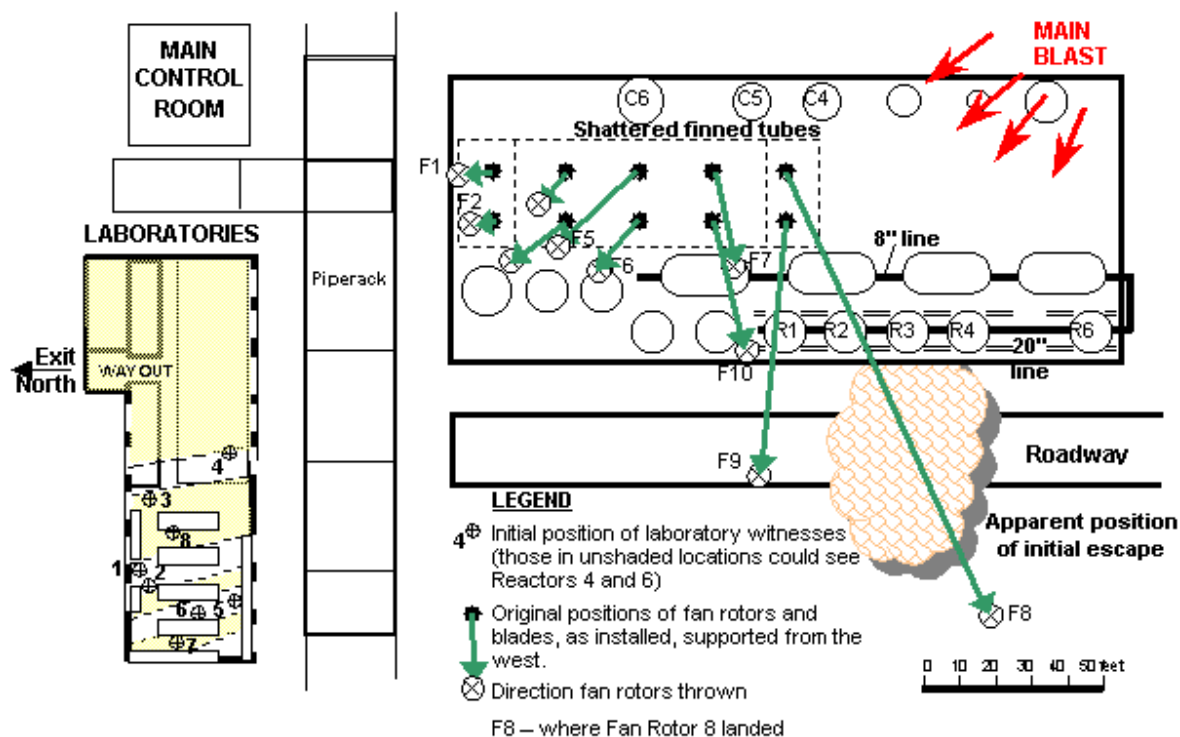


Figura 5.26: Vista dai laboratori

Per quanto riguarda la sezione 25A, i reattori, realizzati in acciaio di media resistenza, erano caratterizzati da:

- altezza $h = 5$ m;
- diametro $D = 3,5$ m;
- spessore $s = 13$ mm;
- un cordone di saldatura sul tubo della linea di 3 mm.

Ciascun reattore era dotato di un parafiamma all'interno e di una valvola di sfogo, al fine di tenere sotto controllo il livello. Tutti i reattori tranne il 4 (R 2524) avevano un agitatore. Esattamente 2 mesi prima dell'esplosione venne trovata una micro-fessura nel reattore 5 (R 2525), pertanto si decise di installare un tubo d'acciaio inossidabile 304L, del diametro esterno di 50 cm (20 pollici), per collegare il reattore 4 (R 2524) con il reattore

6 (R 2526), escludendo così l'R 2525. Si confronti a questo proposito la Fig. 5.28. Ciò venne fatto con l'intenzione di non interrompere il ciclo di produzione e riparare il reattore fratturato.



Figura 5.27: . Fotografia dell'impianto durante la costruzione. Sono visibili i 6 reattori collegati in serie.

La modifica sostanziale nella configurazione impiantistica originale¹², che causò il disastro, fu proprio l'installazione della tubazione provvisoria da 20 pollici (la tubazione originaria di collegamento tra i reattori era di 28 pollici) dotata di soffietti ad entrambe le estremità (Fig. 5.28). Data la modalità di collegamento (a zampa di cane) e la pressione a cui lavorava la tubazione, questa, non essendo adeguatamente sostenuta, si incurvò; inoltre i soffietti erano stati montati male, per cui vi fu una perdita di prodotto che innescò l'incidente.

¹²Nella configurazione originale tutti i reattori erano collegati da un tubo a soffietto di diametro interno di 71 cm (28 inch) e assemblati con un tubo circolare d'acciaio 316L di 711 mm di diametro esterno. Ciascuno dei 12 segmenti a soffietto (2 per reattore), esterni al collegamento, aveva un diametro principale di 750 mm ed era spesso quanto un foglio di carta (1 mm). Questo rivestimento era quindi alto 37 mm e aveva un passo di 37,9 mm. Inoltre i 12 segmenti esterni in tutto erano lunghi 23 cm e saldati al tubo di acciaio 316L; nel tubo di collegamento era presente uno spaccafiamma di 6,75 mm.

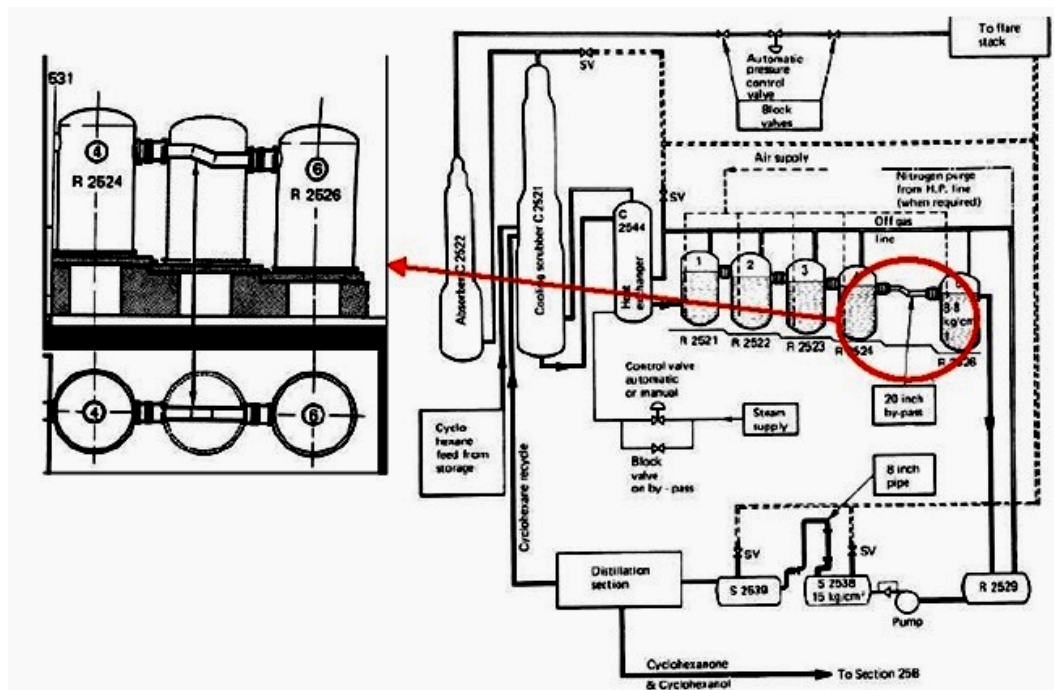


Figura 5.28: Configurazione dell'impianto dopo la modifica

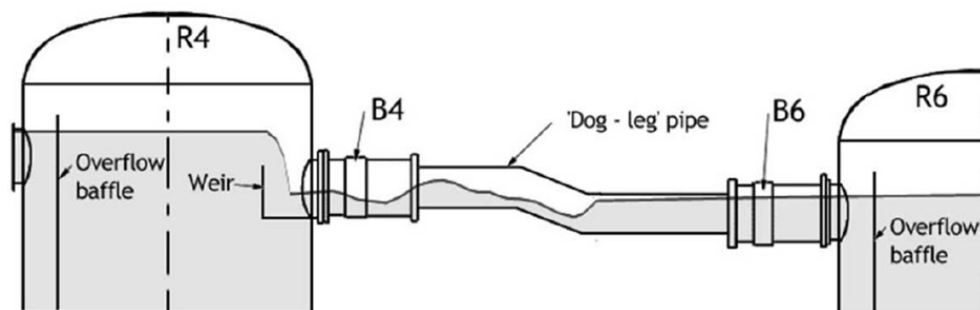


Figura 5.29: Collegamento tra i 2 reattori. Si vede il livello del cicloesano nei reattori e nel tubo di collegamento. Il modo in cui era stato montato il tubo d'esclusione accelerava il flusso e generava turbolenza, a causa del gradiente di velocità, incrementando così la caduta di pressione del fluido stesso.

1. Grazie alla forma a zampa di cane del tubo di collegamento e alla differenza di diametro tra i due segmenti, si generarono coppie di forze che caricavano verticalmente il tubo, incurvandolo, e il collegamento a soffietto.
2. Il by-pass venne realizzato in maniera grossolana: il supporto, sottodimensionato, era stato realizzato con materiale da impalcatura (barre metalliche), che non permetteva alla flangia di oscillare (ad esempio a causa dell'espansione termica del reattore).
3. Furono apportate significative modifiche allo scarico del reattore 4.

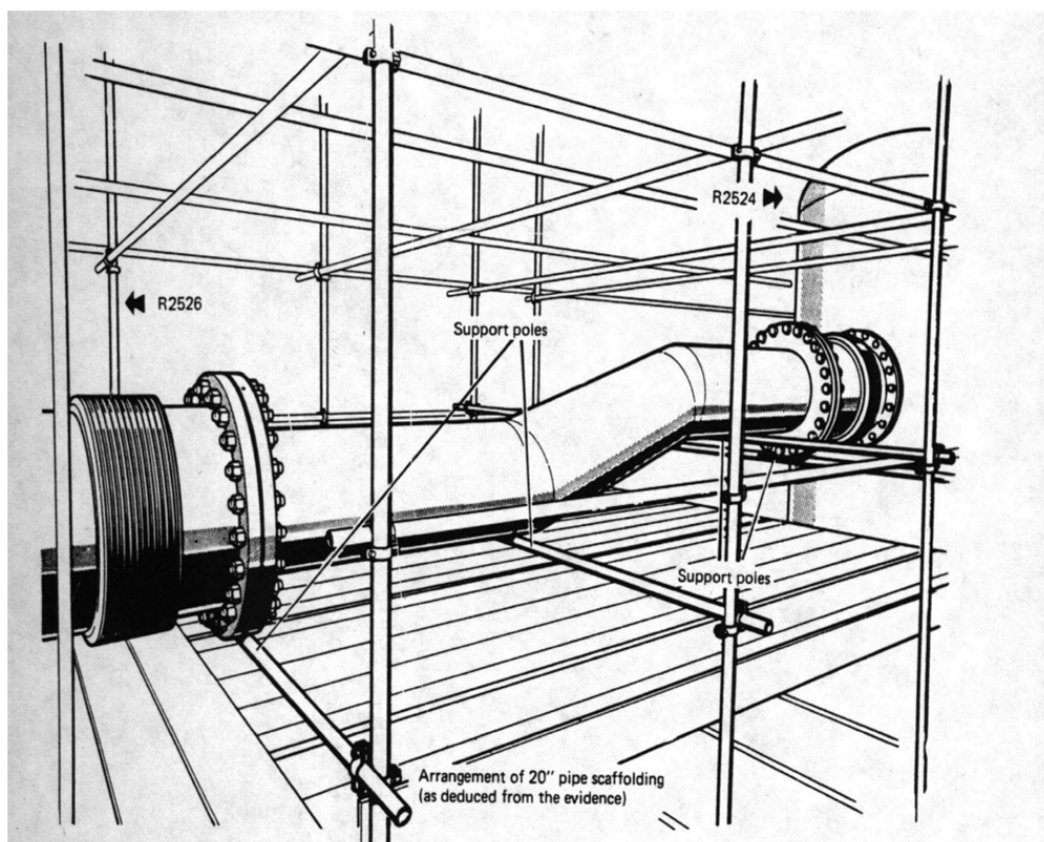


Figura 5.30: Tubo di bypass tra reattore 4 e 6 con relativi supporti (struttura di barre metalliche). L'immagine mostra che le giunzioni bullonate del tubo poggiavano direttamente su barre di metalliche, non lasciando nessun grado di libertà al tubo di bypass.

E' importante notare che sul tubo di bypass non venne eseguita alcuna valutazione sperimentale, né alcuna simulazione di tenuta di pressione, né della portata nel tubo, ma solamente un dimensionamento di massima. Inoltre l'intelaiatura di supporto di tipo rigido, senza smorzamento, non permetteva al tubo di vibrare e quindi di dissipare energia. Pertanto il tubo d'esclusione venne sollecitato a fatica per due mesi, finchè quello sfortunato 1 giugno 1974 un aumento di pressione nei reattori, se pur inferiore a quella di progetto, portò il collegamento di bypass a vibrare ad una frequenza vicina alla frequenza propria delle flange a soffietto. Nel giro di pochi istanti il sistema entrò in risonanza e le forze scaricate in maniera rigida sulle flange di collegamento aumentarono esponenzialmente fino a portare alla rottura della flangia che collegava il reattore 6 al tubo di bypass e alla conseguente fuoriuscita di cicloesano. In Fig. 5.31 si riporta una ricostruzione delle fasi di distacco del tubo di bypass.

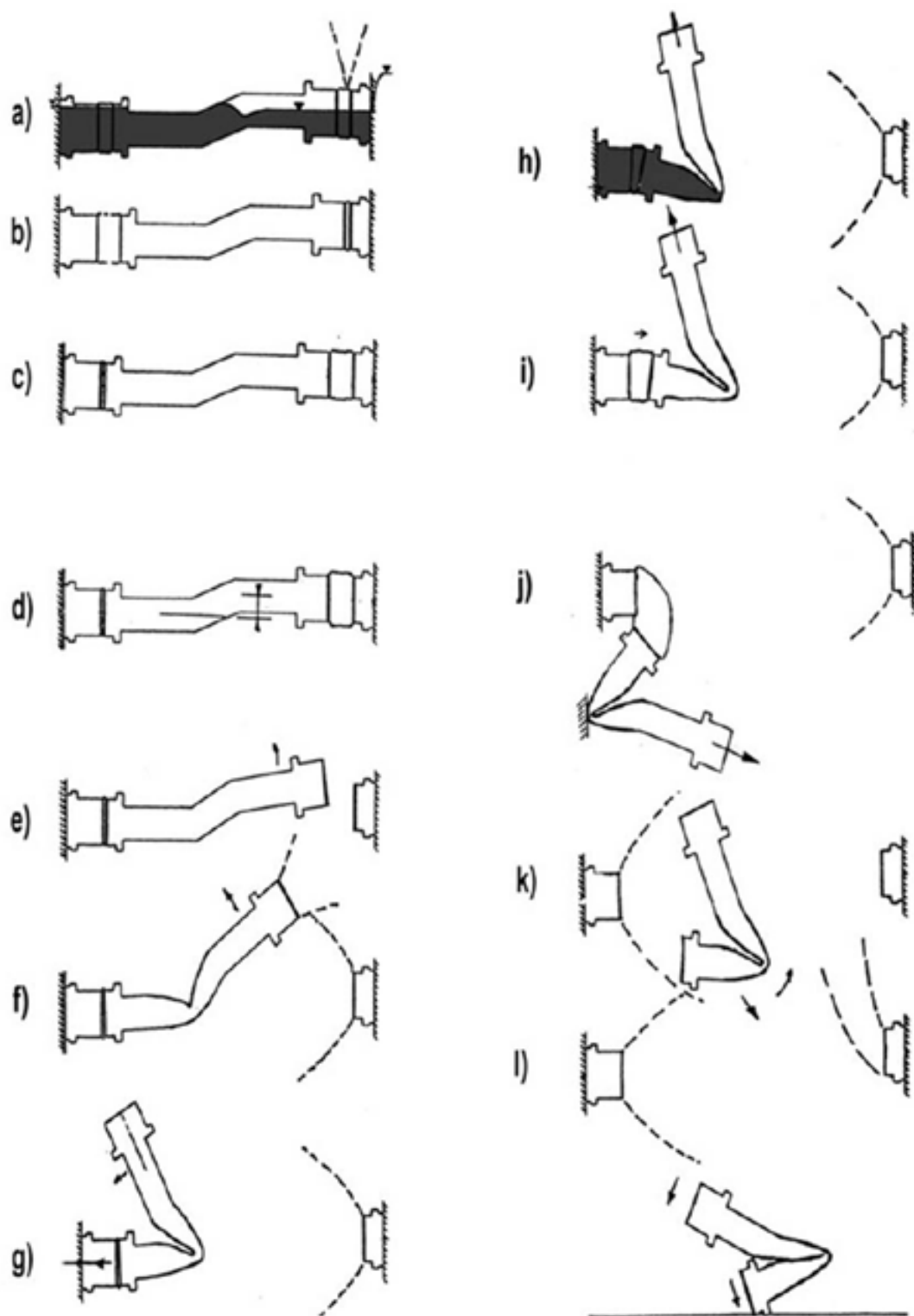


Figura 5.31: Fasi del distacco completo del tubo di bypass. L'immagine mostra che il distacco del tubo di bypass dal reattore 6 provocò una deformazione particolare del tubo, perché appunto il collegamento aveva forma a zampa di cane. A seguito della deformazione del tubo si creò un picco di pressione nella strozzatura che fece staccare il tubo anche dal secondo reattore.

Dunque a seguito della rottura fuoriuscì cicloesano liquido ¹³ a 9,6 bar e 155°C, che vaporizzò immediatamente, dato che a pressione atmosferica $T_{eb} = 81^\circ\text{C}$. In meno di un minuto (il ritardo d'innescò è stimato sui 45-90 s) si verificò una perdita di 30-50 t di cicloesano, che andò a formare una nube infiammabile. Questa venne probabilmente innescata in una fornace dell'impianto di produzione dell'idrogeno, situato a circa 100 m dal punto di rilascio (Fig. 5.25 e 5.24) [60]. E' importante precisare che non si ha certezza sul punto d'innescò della nube. Molti autori (Venart, 2004 [75]), in base a differenti modelli di dispersione e trasporto della nube (quel giorno a Flixborough il vento soffiava da sud - sud ovest ad una velocità di circa 4-7 m/s), individuano il punto d'innescò in corrispondenza della strada che si trovava esattamente di fronte all'ufficio principale (cfr. Main Office in Fig.5.25). In tal caso l'estremità della nube avrebbe percorso una distanza minore (drift < 100 m) e il ritardo nell'innescò sarebbe stato di 45 s circa. In ogni caso tutto avvenne in tempi talmente brevi che nessun operaio dell'azienda si accorse del rilascio.

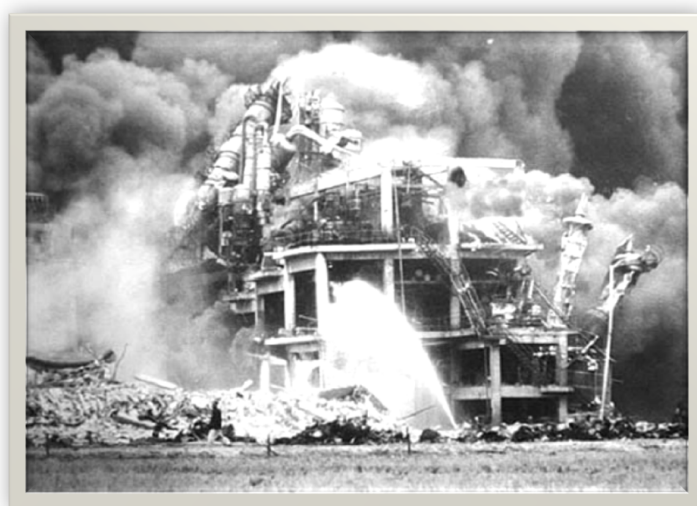


Figura 5.32: Vista nord. Macerie del principale edificio ad uso uffici nella sezione 27 (adiacente alla 25A da cui partì la perdita). Fortunatamente l'esplosione avvenne di sabato, perciò i tre piani dell'edificio non erano occupati, altrimenti il bilancio delle vittime sarebbe stato ben peggiore (intorno alle 500 vittime).

¹³Il flusso di materiale infiammabile si trovava allo stato di liquido surriscaldato (155°C, 0,96 MPa) nel treno di reattori di ossidazione. Infatti a 150-155°C la pressione di saturazione del cicloesano è di 0,55-0,6 MPa. Più precisamente a 150-155°C e 0,96 MPa il flusso era costituito da liquido (99,5-99,6% C_6H_{12} con 0,5-0,4% di azoto/aria) e da vapore (61-68% C_6H_{12} , 32-39% azoto/aria).



Figura 5.33: Il parcheggio dello stabilimento a sud-est dell'edificio principale. La distruzione completa delle autovetture e delle strutture indica un notevole incremento della pressione, anche perché il parcheggio si trovava a oltre 30 metri dal centro della esplosione, sotto le ipotesi di Venart [75].

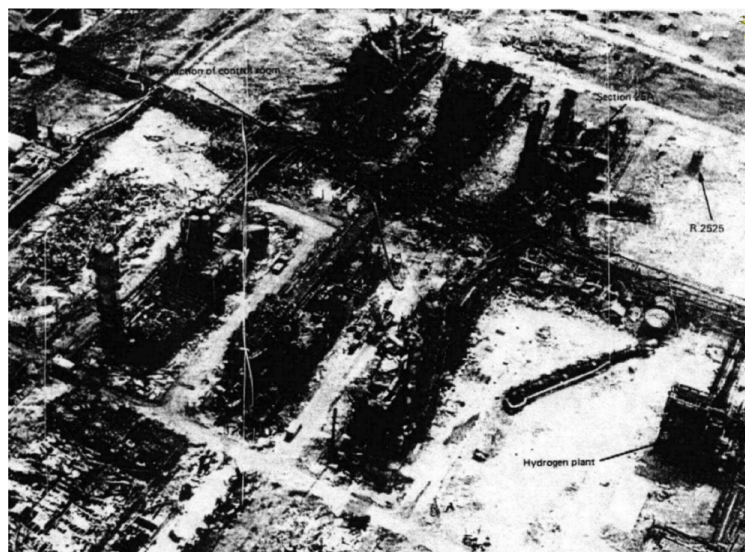


Figura 5.34: Danni dovuti all'esplosione visti dall'alto. Pochi anni dopo l'esplosione lo stabilimento fu in parte ricostruito e rimesso in funzione, nonostante le proteste della comunità locale, per poi essere successivamente chiuso pochi anni dopo a causa del crollo del prezzo del nylon. Davanti agli uffici principali fu eretto un monumento, con una targa in bronzo a memoria delle vittime di quel giorno. Attualmente quello che rimane dello stabilimento è occupato in parte da edifici ad uso commerciale e da una centrale elettrica, la centrale elettrica di Grandford.

CAPITOLO 6

INCIDENTE DI VIAREGGIO (2009)



Figura 6.1: Vagone di testa deragliato nella stazione di Viareggio (a sinistra) e immagine dettagliata dello squarcio nella cisterna di GPL (a destra).

Nella notte di lunedì 29 giugno 2009, alle 23:48 durante il transito di un convoglio ferroviario nella stazione di Viareggio (Lu), deragliarono dieci vagoni che portavano delle cisterne contenenti GPL, ed una di tali cisterne rilasciò all'esterno una notevole quantità della sostanza, che in seguito esplose provocando ben 32 decessi oltre a notevolissimi danni agli immobili.

Il carro cisterna considerato faceva parte di un convoglio (treno merci), che trasportava 630 t di GPL distribuite su 14 unità, ed era partito la sera precedente dalla raffineria

Sarpom a San Martino di Trecate (No)¹, dove il GPL era stato trasferito dai silos dello stabilimento all'interno dei carri cisterna². In seguito, dopo essere stati instradati verso Novara, i vagoni erano stati agganciati al convoglio diretto a Gricignano d'Aversa, nel Casertano, a pochi chilometri da Casal di Principe, dove è situata l'azienda alla quale era destinato il GPL: la Aversana Petroli S.r.l., appartenente alla famiglia dell'allora sottosegretario all'Economia, Nicola Cosentino. Tale azienda riceve mediamente un carico alla settimana, che poi viene distribuito alle stazioni di rifornimento delle province di Caserta e di Napoli.

Durante il suo viaggio verso sud, il treno merci attraversò Viareggio, il principale nodo ferroviario della provincia di Lucca e a causa del cedimento del carrello frontale del primo carro cisterna, in prossimità della stazione della città toscana, avvenne il deragliamento.

6.1 Scenario incidentale

Stando all'indagine, per ragioni di sicurezza il convoglio, che viaggiava a 90 km/h (cioè al di sotto del limite di velocità di 100 km/h), non doveva fermarsi a Viareggio. Proprio quando il treno si trovava in prossimità della stazione, si verificò il deragliamento del primo carro cisterna in seguito alla rottura dell'assale anteriore, a causa di una crepa. Tale crepa, individuata nella connessione tra assale frontale e ruota, causò il ridursi progressivo della sezione resistente dell'assale stesso fino al cedimento catastrofico. A quel punto avvenne il distacco dalla locomotiva del primo carro cisterna, che deragliò trascinando con sé altri 9 vagoni. In seguito a ciò il primo vagone andò a impattare contro un palo a forma di 'L', che era stato incassato nel suolo per scopi di segnalazione; questo produsse uno squarcio longitudinale, di circa 50 cm di lunghezza e qualche centimetri di larghezza, nel serbatoio di metallo. Si noti che le effettive dimensioni del foro sono di difficile valutazione, perché il giudice incaricato dell'indagine fece sequestrare il vagone. Tuttavia, secondo quanti poterono esaminarlo, lo squarcio, di forma trapezoidale, era di dimensioni comprese tra i 90 ed i 220 cm².

¹La Sarpom (Società per azioni raffineria padana oli minerali) di San Martino di Trecate (No), situata ai confini del Parco Naturale del Ticino, all'interno del triangolo industriale Milano - Torino - Genova, tratta ogni anno circa il 7% dei prodotti petroliferi consumati in Italia. L'azienda occupa attualmente circa 400 addetti con un indotto di oltre 1.500 persone e si estende su un'area di oltre un milione di m². La Esso detiene la maggioranza del pacchetto azionario (74,1%), mentre il restante (25,9%) appartiene alla Erg.

²Vagoni speciali prodotti dalla Gatx, azienda capofila del settore in Europa, capaci di trasportare 35 m³ di GPL. I documenti di viaggio del convoglio riportavano il propano quale sostanza trasportata.

I due macchinisti si resero conto dell'imminente catastrofe avvertendo un forte strattone nella trazione. Pertanto si affacciarono al finestrino, videro la prima cisterna fuori sagoma (in fase di deragliamento) e arrestarono il convoglio. Una volta azionati i freni d'emergenza, i due fuggirono portando con sé i documenti relativi alla merce trasportata. Appena scesi dal convoglio, gli operatori si trovarono immersi in una nube di combustibile, dalla quale uscirono riparandosi poi dietro ad un muretto. A questo punto udirono le prime esplosioni.

La corsa della locomotiva terminò a circa 35 m dal primo vagone deragliato (una distanza simile separava anche il primo carro cisterna dal resto del convoglio, cfr. Fig. 6.3).

La fuoriuscita di GPL dallo squarcio nel primo vagone andò a formare una nube bianca e densa di gas, che iniziò ad avanzare verso il quartiere Terminetto, che circonda la stazione ferroviaria su entrambi i lati (Fig. 6.2), senza però avvolgere le altre cisterne, che rimasero intatte. Ben peggiore sarebbe stato lo scenario nel caso in cui anche queste ultime fossero state coinvolte dalle esplosioni e dall'incendio susseguente.

Le case più vicine si trovavano ad una distanza di circa 11 metri dal luogo dell'incidente, cioè assolutamente insufficiente a garantire la benché minima sicurezza rispetto a un tale scenario.

La nube penetrò nei piani terra e negli scantinati, accumulandosi, finché una sorgente d'ignizione causò gli incendi e le esplosioni. A tutt'oggi non è ancora certo se l'innesco iniziale sia avvenuto in prossimità del convoglio o delle abitazioni vicine. Alcuni testimoni affermano che la nube abbia trovato un innesco in corrispondenza dei binari e che solo in un secondo momento l'incendio (flash fire) si sia esteso alle abitazioni circostanti.

Tuttavia altri sostengono il contrario, ovvero che la nube sia stata ignita in corrispondenza dei piani terra delle abitazioni, e che il flash fire si sia propagato a ritroso verso il carro cisterna deragliato e squarciato.

In ogni caso ciò che è sicuro è che la nube trovò una sorgente d'ignizione (bastano $\approx 0,23$ mJ), con conseguenti esplosioni e incendi.

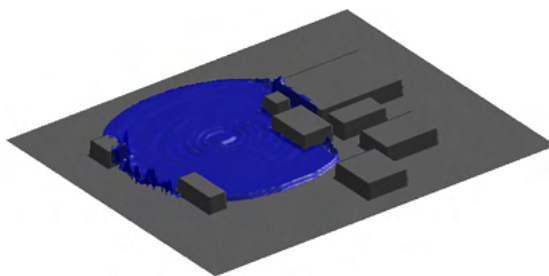


Figura 6.2: Rappresentazione 3D dello spostamento della nube attraverso le strade del quartiere Termetto a 66,6 s dall'inizio del rilascio.

Come è riportato in letteratura, in condizione di regime laminare la velocità di fiamma per gas idrocarburici diluiti in aria è di alcuni metri al secondo, in particolare 1-3 m/s per il GPL. Tale velocità aumenta (fino a raggiungere 10-20 volte il valore iniziale) con la turbolenza generata dalla diffusione stessa dell'onda di incendio dei gas che si espandono e comunicano l'accensione a quelli limitrofi non ancora igniti.

Pertanto il flash fire impiegò pochi secondi a propagarsi dalla massicciata alle case o vice versa. Risulta tuttavia difficile stabilire il tempo intercorso tra la fuoriuscita di GPL e l'ignizione, infatti le testimonianze risultano discordanti e variano a seconda degli intervistati tra 2 min e 5 min.

Cinque abitazioni crollarono per le esplosioni interne (in seminterrati e piani terra), ma molte altre furono completamente avvolte dalle fiamme, soprattutto in Via Ponchielli. Dall'altro lato della stazione in via Burlamacchi, la densa nube di gas si diffuse nei locali della Croce Verde incendiandosi e distruggendo quasi tutto.

Le fiamme che si svilupparono raggiunsero un'altezza tale da essere viste a grande distanza. Infatti una delle vittime, che stava percorrendo un attraversamento pedonale sopra la stazione, pur trovandosi ad un'altezza di circa 8 m, venne letteralmente vaporizzato. Quattordici persone morirono istantaneamente: alcune a causa del crollo degli edifici, altre a causa dell'inalazione di sostanze tossiche legate alla combustione, altre ancora vennero investite dalla radiazione termica (irraggiamento da fiamma). Il bilancio finale fu di 32 morti e più di 30 feriti gravi.

Circa 1100 persone residenti nella zona dovettero evacuare le loro case per ragioni di sicurezza (rischio di nuove esplosioni e/o crollo di edifici gravemente danneggiati).

La vista dall'alto del quartiere Terminetto è riportata in Fig. 6.3, in cui sono evidenziati gli edifici esplosi e danneggiati. I danni infrastrutturali sono stimati intorno ai 32 milioni di euro.

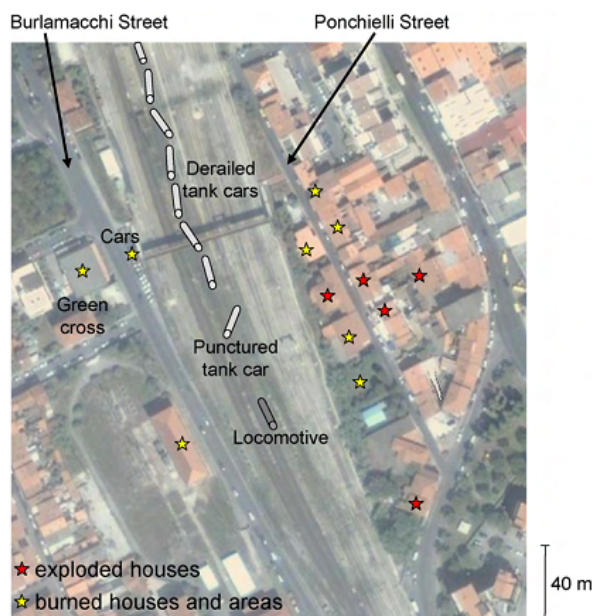


Figura 6.3: Individuazione delle abitazioni esplose e danneggiate.

6.1.1 Fase di rilascio

Il vagone da cui partì il rilascio, come detto in precedenza, era un carro cisterna speciale prodotto dalla Gatx (modello 462R, Fig. 6.4) di forma cilindrica:

- lunghezza $L=15,95$ m;
- diametro $D = 3,04$ m.

La quantità esatta di GPL stoccato nel vagone di testa è sconosciuta, tuttavia sapendo che il treno merci, composto da 14 carri cisterna, trasportava complessivamente 630 t di GPL (m_{tot}), si ottiene un carico iniziale pari a:

$$m_{L0} = m_{tot}/14 = 45 \text{ t}$$

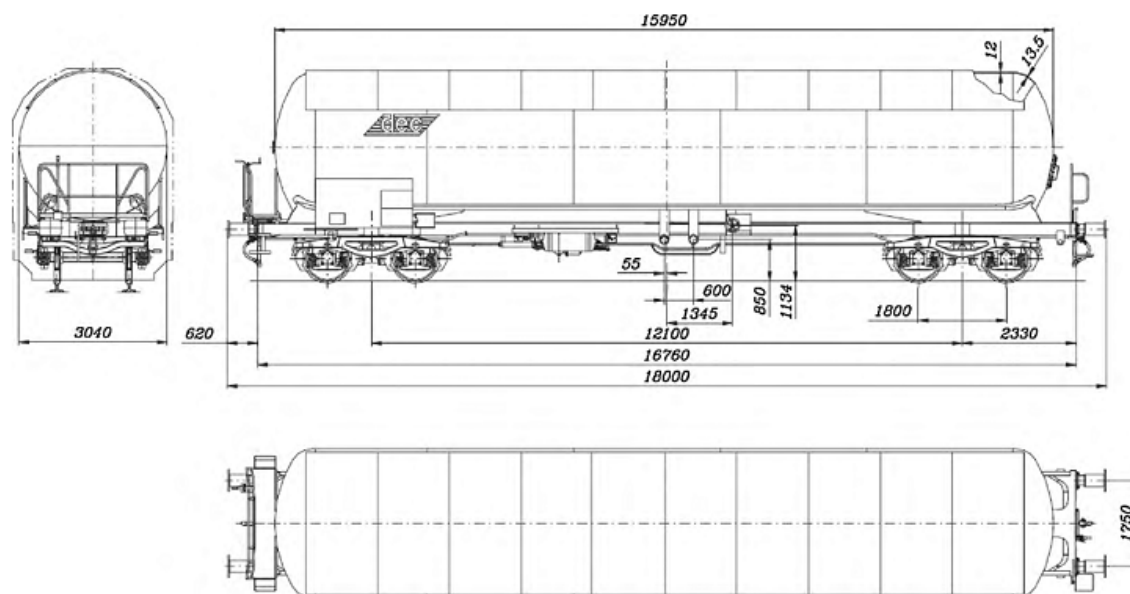


Figura 6.4: Caratteristiche geometriche [mm] della ferro cisterna 462 R.

Tara [t]	33,5
Velocità max con carico [km/h]	100
Velocità max senza carico [km/h]	120
Carico max per asse [t]	20
Carichi massimi [t] a velocità operativa di 100 km/h	A=30,5, B=38,5, C=46,5
Capacità totale cisterna [m³]	110
Pressione di progetto [bar]	25
Pressione d'esercizio [bar]	25
Pressione di prova [bar]	25
Sovrapressione esterna [bar]	1

Tabella 6.1: Scheda tecnica del carro cisterna 462R (Gatx). Le categorie A, B, C sono riferite alle normative internazionali per il trasporto merci (RIV). A è una linea ferroviaria che può sopportare un peso di 16 t/asse, B di 18 t/asse, e C di 20 t/asse. Pertanto, quando si trova C = 46,5 t, la cisterna può trasportare un carico merci complessivo di 46,5 t se il treno percorre una linea ferroviaria di tipo C, che può sopportare un carico massimo di 20 t/asse.

Questa stima del valore del carico è sufficientemente attendibile per delle valutazioni quantitative sull'incidente, in quanto rispetta il massimo consentito per il trasporto in un carro cisterna tipo 462R, che è di 46,5 t (Tabella 6.1).

Un'ulteriore incertezza riguarda la composizione esatta del GPL (i documenti di viaggio riportavano una miscela di propano quale sostanza trasportata). Tutti i calcoli seguenti, impostati in base alla ricostruzione e modellazione dell'evento realizzata dai docenti e ricercatori S. Brambilla e D. Manca del Dipartimento di Chimica 'Giulio Natta' [67], assumono che il GPL fosse propano puro.

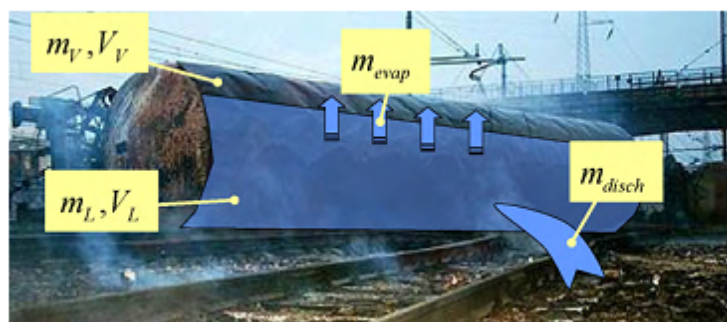


Figura 6.5: Illustrazione dei termini e dei simboli utilizzati per simulare il rilascio.

La frattura nel carro cisterna deragliato era situata nella parte inferiore della vettura (Fig. 6.1), pertanto il GPL rilasciato si trovava allo stato liquido. Inoltre si può escludere che durante lo scarico vi sia stato rientro d'aria nel serbatoio, sia per la posizione della fessura, sia perchè la cisterna era pressurizzata. Di conseguenza, una frazione di liquido sicuramente evaporò subito per mantenere costante la pressione interna nel serbatoio (ovvero la tensione di vapore alla temperatura del liquido). L'evaporazione ovviamente sottrasse energia alla rimanente frazione di liquido che incominciò così a raffreddarsi.

Per determinare la portata di liquido scaricata attraverso lo squarcio è stato necessario modellare la dinamica (bilanci di massa e d'energia) sia della fase liquida che della fase vapore presenti all'interno del carro cisterna (si veda Fig. 6.5 per i simboli).

Direzione del vento	NEE
Velocità del vento [m/s]	<1
Temperatura dell'aria [°C]	23
Pressione ambiente [mbar]	1008
Umidità relativa	80%

Tabella 6.2: Condizioni meteorologiche relative alla notte del 29.06.2009 misurate a circa 1,7 km dall'epicentro dell'incidente tra le 23:00 e le 24:00.

Facendo sempre riferimento alla Fig. 6.5, in seguito allo squarcio il livello di liquido nella cisterna ($\dot{m}_L$) iniziò a diminuire sia a causa dell'evaporazione interna ($\dot{m}_{\text{evap}}$), sia a causa dello scarico attraverso il foro ($\dot{m}_{\text{disch}}$), mentre la variazione nel tempo del vapore di riempimento ($\dot{m}_V$) è imputabile alla sola evaporazione.

I bilanci di massa all'interno del carro cisterna possono dunque essere scritti come segue:

$$\begin{cases} \frac{dm_L}{dt} = -\dot{m}_{\text{disch}} - \dot{m}_{\text{evap}} \\ \frac{dm_V}{dt} = \dot{m}_{\text{evap}} \end{cases}$$

In base a quanto visto al Capitolo 4, la portata di liquido scaricata ($\dot{m}_{\text{disch}}$) può essere calcolata con l'equazione 4.2, già riportata a pag.110:

$$\dot{m}_{\text{disch}} = \rho_L A_f c_D \sqrt{\frac{2}{\rho_L} (P - P_{\text{amb}}) + 2gh_L}$$

dove **P=9 bar** è la pressione interna del serbatoio prima dell'incidente, pari cioè alla tensione di vapore del GPL alla temperatura ambiente (cfr. Tabella 6.2)³. Inoltre in base all'immagine dello squarcio (Fig. 6.1) e alla testimonianza di una persona che poté esaminare il vagone in questione, si è assunto che il foro fosse 40 cm × 2,5 cm, ovvero $A_f = 100 \text{ cm}^2$ [67]⁴. Dal momento che lo squarcio aveva dei contorni aguzzi e irregolari, si è considerato un coefficiente d'efflusso $c_D = 0,62$.

La portata di liquido che evaporava $\dot{m}_{\text{evap}}$ internamente alla cisterna è stata calcolata imponendo la conservazione del volume:

$$V = \frac{m_V}{\rho_V} + \frac{m_L}{\rho_L}$$

Trascurando la variazione delle proprietà chimico-fisiche nel tempo e derivando questa equazione si trova che:

$$\frac{dm_V}{dt} = \frac{dm_L}{dt} \frac{\rho_V}{\rho_L} = \dot{m}_{\text{evap}} \quad (6.1)$$

per cui sostituendo nel primo sistema si ottiene:

³il 29.06.09 vi era una $T_{\text{amb}} = 23^\circ\text{C}$, $\rightarrow P = P_{\text{vap}}(T_{\text{amb}} = 23^\circ\text{C}) = 9,048 \text{ bar}$ (valore tratto da REFPROP-NIST Reference Fluid properties)

⁴Questo valore è in accordo anche con la stima degli esperti, che riportarono un'area del foro di 90-220 cm^2 .

$$\frac{dm_L}{dt} = -\frac{\dot{m}_{disch}}{[1 - (\rho_V/\rho_L)]}$$

L'ipotesi che le densità non varino nel tempo (al variare della temperatura) è ragionevole considerando tempi caratteristici di rilascio molto brevi ($\rightarrow \Delta\rho$ molto piccoli).

Il bilancio energetico può essere scritto come:

$$(m_L c_{pL} + m_V c_{pV}) \frac{dT}{dt} = -\dot{m}_{evap} \Delta H_{ev} \quad (6.2)$$

L'eq. 6.2 è valida nell'ipotesi di sistema adiabatico, ovvero di scambio termico nullo con l'esterno. Questa ipotesi non introduce un'approssimazione troppo grande se si considerano brevi tempistiche di scarico e temperatura del GPL all'interno del serbatoio prossima a quella ambiente.

Infatti per i calcoli si è ipotizzato che inizialmente il propano fosse a temperatura ambiente $T_{amb} = 23^\circ\text{C} = 296\text{ K}^5$.

Il problema del rilascio del GPL contenuto nel vagone di testa è stato risolto (in termini di variazione nel tempo della massa di liquido (m_L), della massa di vapore (m_V) e della temperatura del liquido T nel serbatoio) mediante la soluzione del seguente sistema di equazioni differenziali ordinarie (ODE):

$$\begin{cases} \frac{dm_L}{dt} = -\frac{\dot{m}_{disch}}{[1 - (\rho_V/\rho_L)]} \\ \frac{dm_V}{dt} = \dot{m}_{evap} \\ \frac{dT}{dt} = -\frac{\dot{m}_{evap} \Delta H_{ev}}{m_L} c_{pL} + m_V c_{pV} \end{cases}$$

dove $\dot{m}_{disch}$ viene calcolata con l'eq.(4.2) e $\dot{m}_{evap}$ con l'eq.(6.1). Per risolvere il suddetto sistema si è scritta una routine Matlab che utilizza la funzione predefinita 'ode45'⁶. Il livello del liquido all'interno della cisterna (h_L) è stato calcolato come funzione del volume di liquido (V_L) e delle caratteristiche geometriche del serbatoio, considerandolo

⁵Anche nel caso in cui il GPL si fosse scaldato a causa della radiazione solare incidente durante il trasporto diurno, avrebbe avuto il tempo di raffreddarsi dopo il tramonto (≈ 4 ore tra tramonto, ore 20:04, e incidente, ore 23:48) grazie alla convezione forzata tra il treno in corsa e l'aria esterna.

⁶**ode45** è basato su Runge-Kutta esplicito (di ordine 4 o 5), altrimenti noto come Dormand-Prince. È un risolutore a singolo passo, cioè nella computazione di $y(tn)$, ha bisogno soltanto della soluzione nel passo immediatamente precedente, $y(tn-1)$.

come un cilindro orizzontale schiacciato ai lati:

$$V_L = L \left[R^2 \arccos(1 - h_L/R) - (R - h_L) \sqrt{2Rh_L - h_L^2} \right] \quad (6.3)$$

dove $R=1,52$ m è il raggio del carro cisterna ed $L=15,95$ è la sua lunghezza. Ad ogni k -esimo passo temporale il volume del liquido (V_L) si deduce dalla sua massa (m_L), calcolata dalla soluzione del sistema ODE al passo precedente, e dalla sua densità (ρ_L):

$$V_L^k = \frac{m_L^{k-1}}{\rho_L}$$

In Fig. 6.6 viene mostrata la dinamica di scarico del GPL liquido attraverso il foro: con le assunzioni fatte risulta che 45 t di GPL liquido furono scaricate in appena 262 s, ovvero 4 min e 22 s.

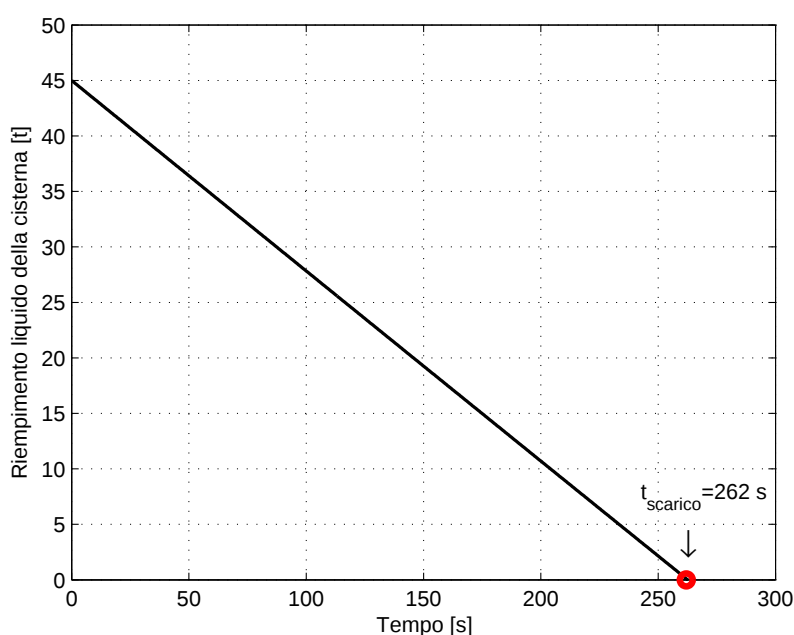


Figura 6.6: Dinamica di scarico del liquido attraverso lo squarcio nell'ipotesi d'innesco successivo alla fine del rilascio.

La Fig. 6.7 mostra invece la riduzione nel tempo della temperatura della frazione di liquido rimasto all'istante k nel serbatoio. Alla fine dello scarico il liquido raggiungeva la temperatura minima di 282 K ($=9^\circ\text{C}$), corrispondente ad un decremento di ≈ 14 K.

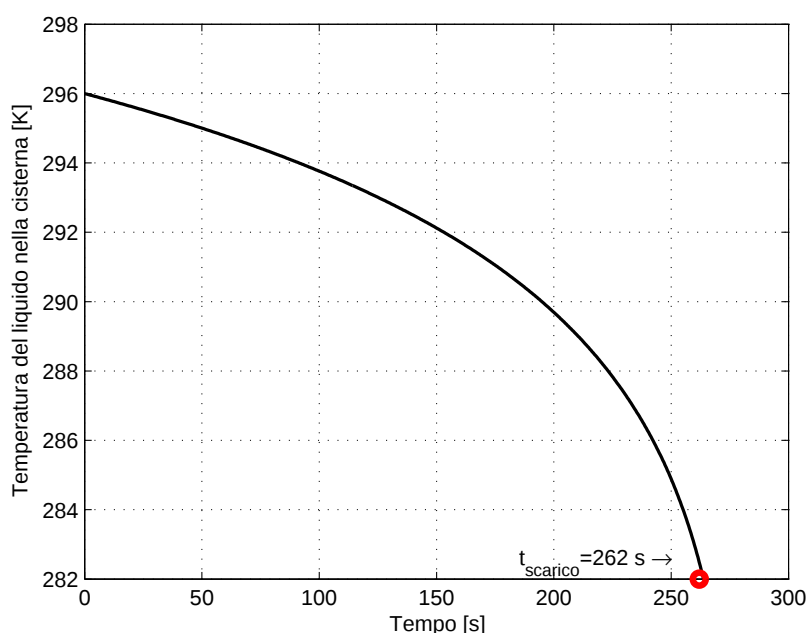


Figura 6.7: Diminuzione della temperatura del liquido nel serbatoio a causa dell'evaporazione interna.

Terminato lo scarico del liquido, all'interno della cisterna vi erano ancora 1273 kg di vapore di GPL, ovvero una quantità di combustibile pari al 2,8% del carico iniziale di GPL liquido. E' quindi importante notare che una volta fuoriuscito tutto il liquido dallo squarcio, il carro cisterna si trovava ancora sotto pressione, pertanto i vapori di GPL cominciarono a fluire attraverso il foro in condizioni di regime sonico. Infatti:

$$\frac{P}{P_{amb}} \geq \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

dove la costante isoentropica per il GPL vale $\gamma = 1,13$. La portata di vapore scaricata può essere calcolata con la eq.(4.3) riportata a pag. 111.

Si noti che questa analisi è valida solo se l'innesco della pozza di GPL, che iniziò a dilagare sulla massicciata, ebbe luogo dopo la fuoriuscita di tutto il GPL liquido dalla cisterna perforata (ritardo d'ignizione = 5 min). In caso contrario il bilancio energetico cambierebbe, eq.(6.2), per la presenza di un ulteriore addendo (al secondo membro) relativo alla radiazione termica prodotta dal pool fire verso il carro cisterna danneggiato (ritardo d'ignizione = 2 min).

ρ_L	densità del liquido [kg/m ³]	495,22
ρ_V	densità del vapore [kg/m ³]	19,596
A_f	area del foro [cm ²]	100
c_D	coefficiente d'efflusso	0,62
P	pressione interna cisterna [bar]	9
P_{amb}	pressione atmosferica [bar]	1,008
g	accelerazione gravitazionale [m/s ²]	9,81
cp_L	calore specifico del liquido [kJ/kg K]	2,7152
cp_V	calore specifico del vapore [kJ/kg K]	2,0452
ΔH_{ev}	calore latente d'evaporazione [kJ/kg]	338,75
L	lunghezza carro cisterna [m]	15,95
R	raggio carro cisterna [m]	1,52
m_L	massa di liquido nella cisterna [kg]	45000
m_V	massa di vapore nella cisterna [kg]	486,5
T	temperatura del liquido nella cisterna [K]	296

Tabella 6.3: Dati iniziali per la soluzione del sistema ODE.

6.1.2 Flash in atmosfera del getto liquido

Una volta esposto alle condizioni ambiente, il flusso di GPL liquido subì un'evaporazione flash, producendo un getto bifase. Come già si è detto la frazione di flash (frazione massica di vapore) può essere calcolata come [68]:

$$x_V = \frac{cp_L(T - T_{eb})}{\Delta H_{ev}} \quad (6.4)$$

dove T è la temperatura del getto liquido (Fig. 6.7) e $T_{eb} = -41,9^\circ\text{C} = 231.1\text{ K}$ è la temperatura di ebollizione del propano puro alla pressione atmosferica di 1008 mbar (per ΔH_{ev} e cp_L si veda la Tabella 6.3).

L'eq.(6.4) permette di valutare la frazione massica di liquido e di vapore nel tempo sia nel caso di ignizione dopo 2 min che dopo 5 min. In questa trattazione si è considerato solo il secondo caso e dal grafico in Fig. 6.8 si vede che, a causa della variazione di temperatura del liquido, le frazioni di liquido e di vapore variarono di conseguenza.

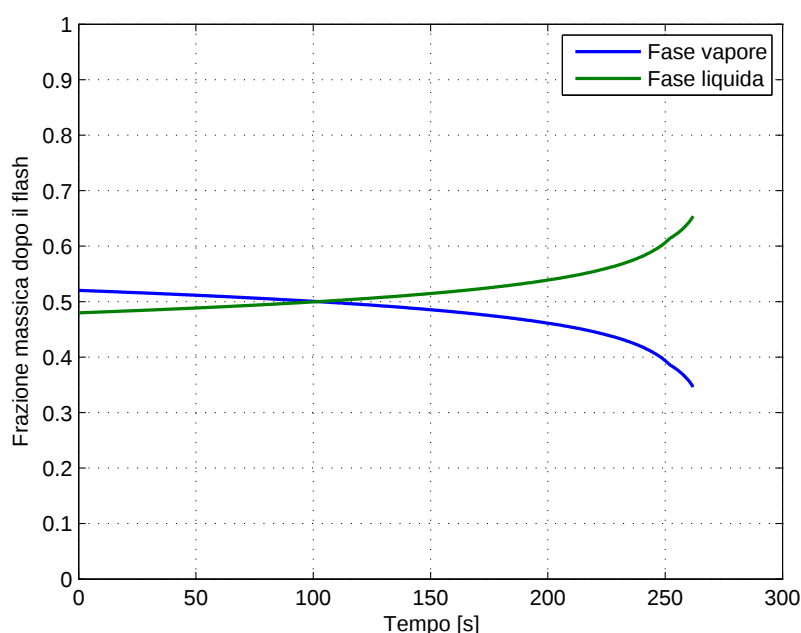


Figura 6.8: Frazione di flash e frazione massica di liquido dopo l'evaporazione flash del getto di liquido scaricato attraverso lo squarcio nel caso d'ignizione dopo 5 min.

6.1.3 Dispersione, evaporazione e incendio della pozza di GPL

Dato che lo squarcio nel serbatoio del vagone si trovava vicino al terreno, è ragionevole pensare che il getto di liquido sia andato a impattare direttamente contro la massicciata e che non abbia avuto il tempo e lo spazio di frantumarsi in gocce. Pertanto si può assumere che la frazione di flash non abbia trascinato del GPL liquido con sé. Ne segue che, sotto questa ipotesi, l'intera frazione massica di liquido (ovvero il complemento a uno della flash fraction) si sia sparsa al suolo, formando un'unica pozza [67].

L'ipotesi che tutto il liquido scaricato dal carro fratturato abbia contribuito o meno a formare una pozza è tuttavia una questione ancora aperta. La Fig. 6.12 mostra che sulla massicciata, vicino alla cisterna di testa ribaltata, si formarono diversi piccoli pool fire non imputabili alla combustione delle traversine di legno. D'altro canto questo fenomeno potrebbe essere attribuito al liquido spruzzato in vari punti e direzioni a causa delle disuniformità della massicciata e della velocità di scarico (30 m/s). Questa spiegazione è supportata dalle dichiarazioni dei macchinisti, che asserirono che durante la fuga dovettero calpestare delle pozze di di GPL lungo la massicciata. Dal momento che la motrice

del convoglio si era arrestata a circa 35 m dal carro fratturato e che una singola pozza realisticamente poteva avere $D_{max} \approx 20$ m, è allora possibile che il liquido scaricato non abbia formato una sola pozza, ma diverse (una pozza principale accompagnata da una serie di pozze isolate più piccole).

Lo spargimento di GPL liquido sulla massicciata, la sua evaporazione, e il ritardo nell'ignizione possono essere valutati solo con accurati modelli numerici (e.g. il software AXIMTM [67], che dà come output il diametro di drag, l'altezza della fiamma e il tilt del pool fire, cfr. Fig. 4.13). e pertanto la loro stima va oltre i propositi di questo studio. E' importante sottolineare che non solo la pozza di liquido, ma anche la frazione di flash prese fuoco, il che comportò un'ulteriore crescita in altezza delle fiamme. Alcuni testimoni oculari riferiscono di un'altezza di fiamma di 25 m (contro i circa 40 m stimati con AXIMTM nell'ipotesi di terreno liscio in assenza di ostacoli). Un simile valore appare ragionevole considerando che la massicciata, come mostrato in Fig. 6.9, non aveva una conformazione regolare, ma presentava cumuli di ciottoli, avvallamenti e numerosi ostacoli, che limitarono quindi lo sviluppo verticale delle fiamme.



Figura 6.9: Immagini che mostrano che la massicciata della stazione di Viareggio non presentava una superficie piana. Al contrario il terreno aveva conformazione irregolare, con alcuni cumuli di ciottoli, depressioni e ostacoli.

6.1.4 Dispersione della nube densa

La frazione di flash del liquido scaricato e il vapore prodotto dall'evaporazione da pozza andarono a formare una nube densa di GPL. La modellazione della dispersione va oltre gli scopi di questa tesi e pertanto si riportano soltanto a livello grafico i risultati dei ricercatori del Natta, ottenuti con AXIMTM (Fig. 6.11). Realisticamente in meno di un

minuto la nube percorse circa 100 m dal punto di rilascio, miscelandosi con l'aria fino a raggiungere una dosatura all'interno del campo d'infiammabilità.

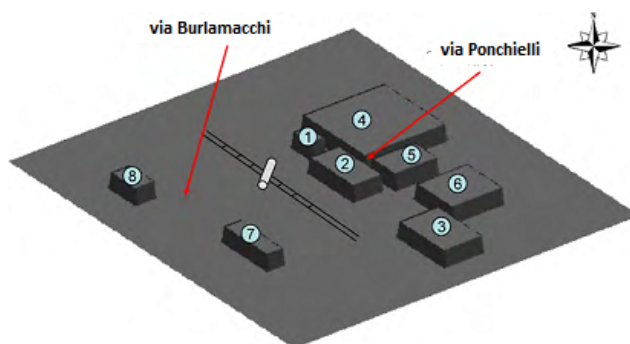


Figura 6.10: Ricostruzione 3D semplificata degli edifici principali nella zona adiacente all'incidente [67].

6.1.5 Conclusioni su esplosioni e incendi

Si può asserire con certezza che a Viareggio non si è trattato di un BLEVE (eventualmente seguito da fireball), ma di un insieme di CVCE, flash fire (e forse di UVCE) del GPL fuoriuscito e disperso nell'ambiente circostante i vagoni. In caso di BLEVE e fireball, come noto, le conseguenze avrebbero potuto essere anche molto peggiori di quello che sono state in questo caso, a causa, principalmente, dell'entità dell'esplosione, delle elevatissime temperature che si sarebbero raggiunte e della proiezione di frammenti.

Per quanto riguarda le esplosioni, è opinione di alcune fonti autorevoli che queste si verificarono esclusivamente all'interno delle case a causa della penetrazione della nube densa di gas attraverso le finestre aperte, nelle cantine e nei piani terra. In generale, gli edifici non sono molto resistenti a sovrappressione quando le esplosioni sono innescate dall'interno. Di fatto, una sovrappressione di 7 kPa è spesso sufficiente a distruggere un tipico edificio di mattoni. Al contempo la presenza di elementi più deboli nei muri (come le finestre), che cedono per primi, forniscono delle aperture di ventilazione all'esplosione, il che si traduce in sovrappressioni minori.

In conclusione in base ad alcuni pareri autorevoli ([80] e [81]) ed a certe evidenze sperimentali (e.g. fotografie, rapporti, testimonianze, rilievi) l'ipotesi di UVCE è da escludersi

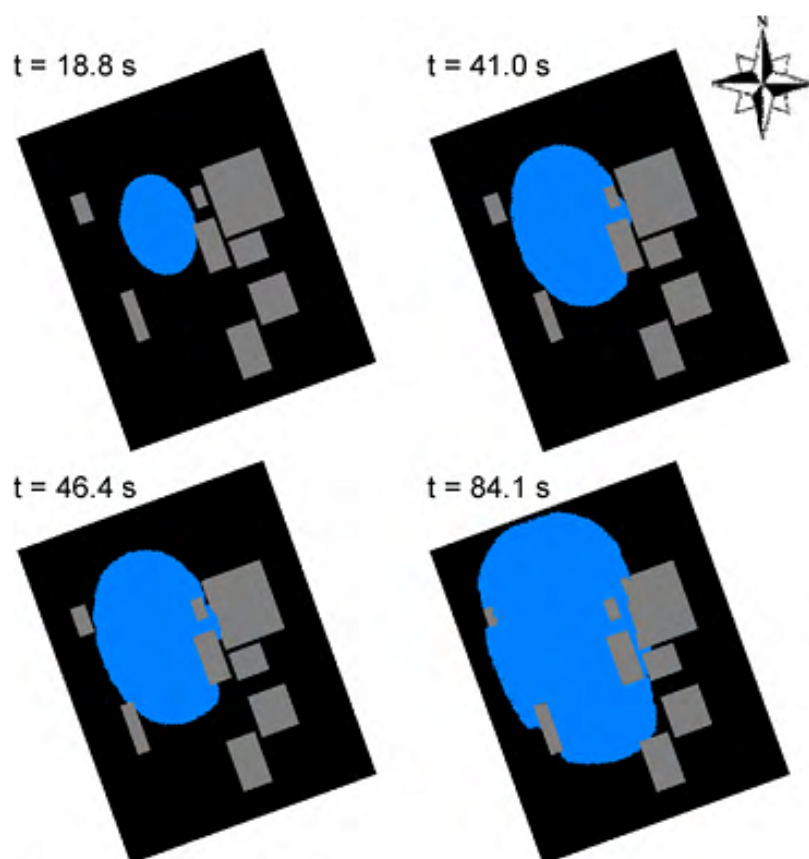


Figura 6.11: Dispersione della densa nube di propano in istanti diversi dall'inizio del rilascio. E' possibile osservare l'infiltrarsi della nube tra le case e il suo inviluppare anche alcuni tetti degli edifici. [67].

(ma ad esempio la Fig. 6.13 mostra danni da sovrappressione su un tetto), nonostante la quantità di GPL fosse al di sopra della soglia limite (1000 kg) e la nube fosse andata incontro a un'ambiente abbastanza congestionato (case più vicine a 11 m dal punto di rilascio).

In ogni caso quest'incidente ha evidenziato la necessità di attuare/installare misure ad hoc di contenimento delle conseguenze da incidenti chimici dovuti al trasporto ferroviario di sostanze pericolose, in prossimità di città e paesi.

Infatti è probabile che uno scudo (*noise shield*) alto un paio di metri avrebbe potuto diluire la nube di gas al di sotto del limite inferiore d'infiammabilità (esperimenti condotti a Thorney Island hanno dimostrato l'efficacia di pareti e barriere nel diluire una nube

di gas denso. Di fatto la concentrazione misurata sottovento rispetto al muro risultava essere la metà di quella misurata in condizioni meteorologiche analoghe ma in assenza di barriere).



Figura 6.12: Formazione di piccoli e isolati incendi in prossimità del vagone fratturato e deragliato.



Figura 6.13: Alcuni edifici crollati.

APPENDICE A

APPENDICE

A.1 Emissioni d'inquinanti nell'autotrazione a GPL

Con l'alimentazione a GPL si riscontrano notevoli vantaggi in termini di emissioni inquinanti, in confronto ai motori alimentati a benzina o gasolio. I vantaggi più evidenti si possono riassumere nei seguenti dati che possono variare, ovviamente, in funzione della tipologia del veicolo e del sistema di alimentazione installato [50]:

- riduzione della CO₂ fino al 10%;
- riduzione del CO fino al 30%;
- riduzione degli HC del 10 ÷ 20%.

I maggiori benefici si ottengono rispetto all'alimentazione diesel, un tipo di motorizzazione che negli ultimi 7-8 anni ha visto incrementare enormemente la sua presenza su vari mercati internazionali, compreso quello italiano.

Di seguito vengono riportati i risultati di studi riguardanti le emissioni di veicoli alimentati a GPL confrontati con veicoli alimentati a gasolio e benzina, effettuati dall'AEGPL (Associazione Europea Produttori di GPL). Nei grafici sottostanti viene anche indicata la rispettiva soglia massima d'inquinamento fissata dalle normative EURO3 e EURO4.

Metodo di esecuzione del test:

EFFETTUATO IN 6 LABORATORI INDIPENDENTI ED ACCREDITATI:

- IFP (Francia)

- MILLBROOK
- PROVING
- GROUND (UK)
- RWTÜV (Germania)
- TNO (Olanda)

IN CONDIZIONI REALI: 30 VEICOLI PRESENTI SUL MERCATO:

- Rappresentativi della gamma delle case automobilistiche
- Auto disponibili sul mercato europeo
- Auto conformi alle norme vigenti sulle emissioni (Euro 3 ed Euro 4)
- Auto con chilometraggio tra i 5.000 e 25.000 km

EMISSIONI MISURATE:

- Gas inquinanti regolamentati: NOX, CO, HC, particolato.
- Gas inquinanti non regolamentati: prodotti ossigenati, BTX, PAH, NO2 e numero di particelle fini ed ultrafini.

ADOZIONE DEL METODO TRIPLO PER RILEVAZIONE DEI DATI:

- 10 modelli testati in tre versioni: a benzina, diesel e GPL mantenendo costanti tutte le altre variabili.
- Tutti i metodi utilizzati sono riconosciuti ed affidabili.
- Ad ulteriore garanzia dei risultati 3 modelli del programma sono stati sottoposti ad un 'test incrociato' come veicoli di controllo nei laboratori.

Tutti i veicoli sono stati testati nella modalità NEDC (New European Driving Cycle), il quale comprende sia la simulazione di un ciclo urbano che di un ciclo extraurbano. Entrambi effettuati con partenza a freddo e a caldo. Inoltre è stato eseguito anche un ciclo CADC (Common Artemis Driving Cycle):

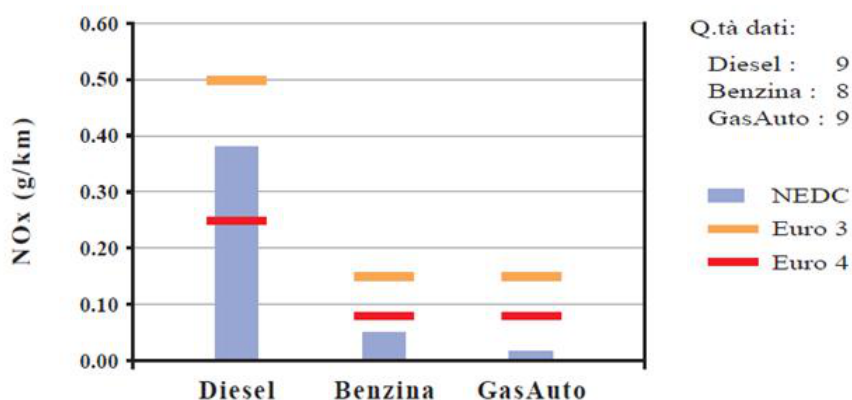
- 40 minuti di ciclo urbano, campestre e percorso autostradale.

- Nell'insieme rispecchia al meglio i parametri europei di guida.

I grafici che seguono riportano i limiti di emissione in giallo per **EURO 3** ed in rosso per **EURO 4**. La direttiva Euro 3 è stata applicata ai nuovi veicoli passeggeri dal 1 gennaio 2000. La direttiva Euro 4 invece è obbligatoria dal 1 gennaio 2005.

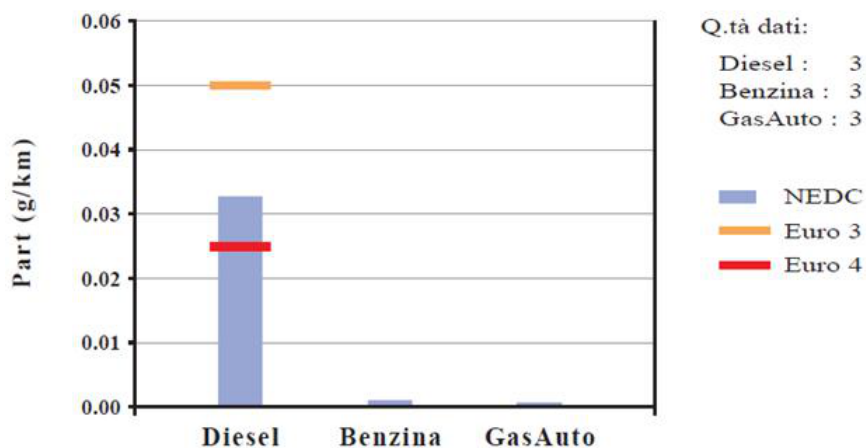
A.1.1 Emissioni NOx

Grazie alle sue intrinseche caratteristiche le emissioni di NOx da veicoli a GPL risultano essere le più basse. Sono infatti il 96% inferiori a quelle dei veicoli diesel ed il 68% inferiori a quelle dei veicoli a benzina.



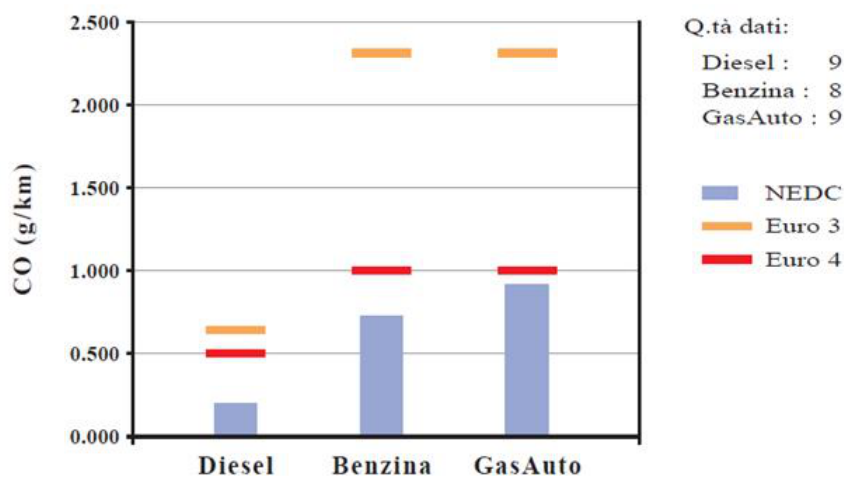
A.1.2 Emissioni particolato

Al momento le emissioni di particolato sono regolamentate esclusivamente per i veicoli diesel. I risultati dei test dimostrano che le emissioni di particolato dei veicoli a GPL sono le più basse. I filtri per particolato per veicoli diesel (DFP) potrebbero diminuire le emissioni di particolato. Tali filtri vengono attualmente installati solo sui nuovi veicoli. Ciò comporta un costo di installazione del filtro nonché costi di manutenzione per il suo corretto funzionamento.



A.1.3 Emissioni CO

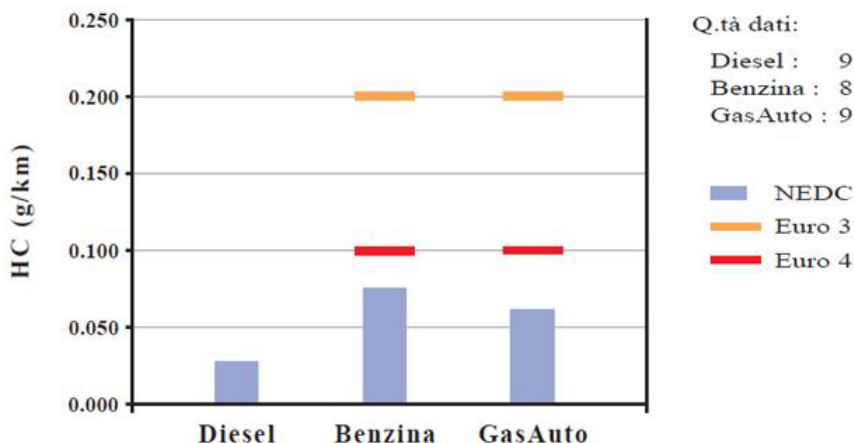
Le emissioni di CO dai veicoli a GPL sono al di sotto dei limiti previsti dalle direttive EURO 3 ed EURO 4, ma superiori a quelle dai veicoli a benzina e a diesel. Si sottolinea che i limiti massimi di CO sono al momento considerati sufficientemente bassi. Lo scenario a breve di EURO 5 non prevede ulteriori diminuzioni dei limiti di CO consentiti.



A.1.4 Emissioni HC

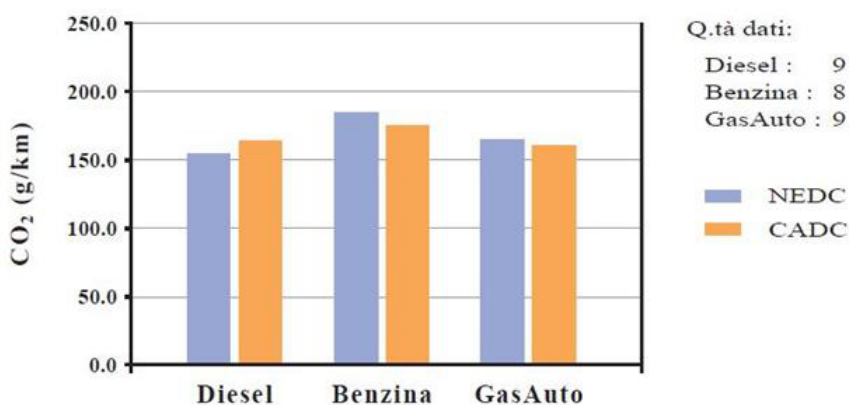
Sono difficilmente individuabili. Le emissioni di HC da veicoli diesel risultano essere le più basse. Le emissioni da veicoli a benzina e GPL rientrano nei rispettivi limiti. Tutte

le emissioni di HC misurate sono comunque vicino ai limiti di affidabilità del metodo di misurazione utilizzato.



A.1.5 Emissioni CO₂

I risultati dei test NEDC mostrano che le emissioni di CO₂ dei veicoli a GPL sono inferiori rispetto a quelle dei veicoli a benzina, ma superiori a quelle dei veicoli diesel. I test in condizioni reali (ciclo CADC) posizionano il GPL quasi al medesimo livello del diesel. Le emissioni di CO₂ del GPL sono praticamente identiche al diesel se si considerano le emissioni sull'intero ciclo di vita dei carburanti. In questo senso, un'ulteriore 'ricerca e sviluppo' da parte delle case automobilistiche e dei produttori di sistemi di alimentazione a GPL potrebbe portare avanti il processo migliorativo dei veicoli a GPL. Il potenziale di ottimizzazione è infatti ancora ampio.



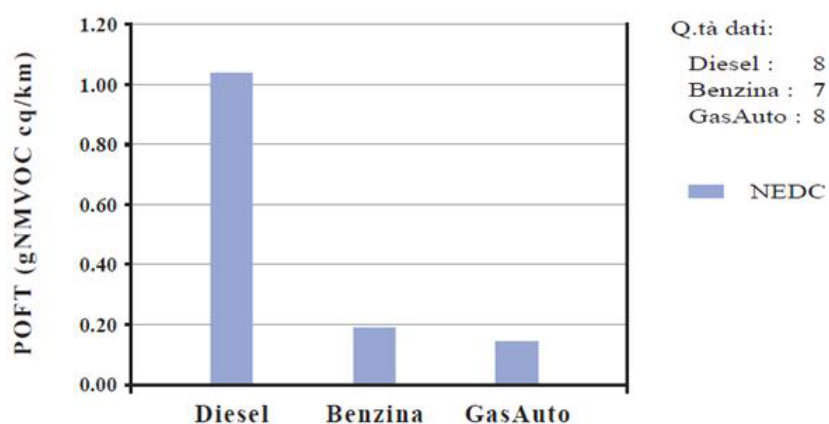
A.1.6 Emissioni non regolamentate

I risultati sui veicoli a GPL sono decisamente positivi.

- Le emissioni di **aldeide** dei veicoli a GPL sono decisamente inferiori rispetto a quelle dei veicoli diesel e leggermente più basse di quelle dei veicoli a benzina.
- Per gli **idrocarburi poliaromatici**, gli attuali metodi di misura sembrano indicare livelli inferiori nelle emissioni dei veicoli a GPL rispetto a quelli relativi alla benzina o al diesel.
- I livelli di **benzene, toluene e Xilene (BTX)** sono bassi sia per il GPL che per il diesel mentre sono notevolmente alti per la benzina.
- Dimensioni del particolato: le particelle solide (superiori a 0,040 m), mostrano emissioni da veicoli a GPL e a benzina da 100 a 1000 volte più basse rispetto ai veicoli diesel.

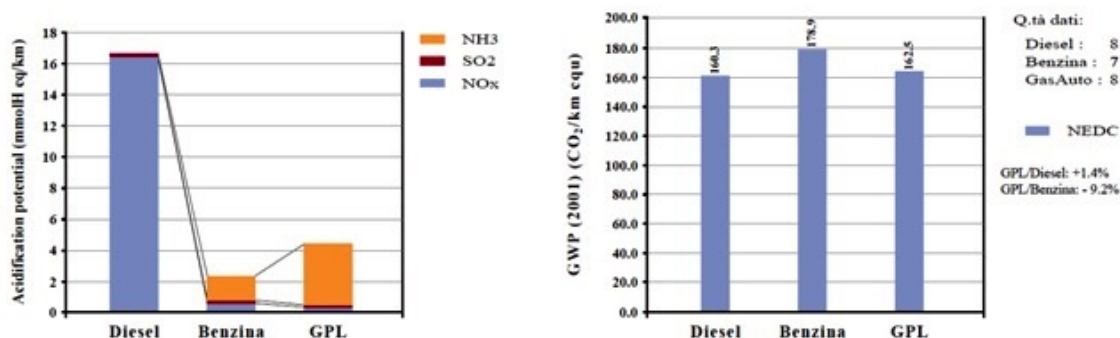
A.1.7 Smog fotochimico

AEGPL ha considerato 2 principali indicatori attualmente utilizzati nella valutazione del livello di ozono, a **livello locale** (PFOF = Potenziale di Formazione Ozono Fotochimico) ed uno più ampio a **livello regionale** (PFOT = Potenziale di Formazione Ozono Troposferico). A livello regionale (PFOT) il GPL è risultato il migliore con valori molto più bassi del diesel. A livello locale (PFOF), i risultati sono essenzialmente opposti poiché non vengono prese in considerazione le emissioni di NOx.



A.1.8 Acidificazione e surriscaldamento globale

Il potenziale di acidificazione (grafico a sinistra, CADC) mostra valori decisamente inferiori per veicoli a benzina e GPL rispetto ai veicoli diesel grazie alle basse emissioni di NO_x. Nel potenziale di surriscaldamento globale (grafico a destra, CADC) il GPL si posiziona fra la benzina e il diesel, con valori più o meno equivalenti a quest'ultimo.



A.1.9 Conclusioni sulle emissioni d'inquinanti

Dai suddetti grafici si possono trarre ovvie conclusioni: il GPL anche nell'uso auto-trazione è nettamente più 'verde' rispetto ai combustibili tradizionali. In certi casi le emissioni sono addirittura di diversi ordini di grandezza inferiori.

In pratica una vettura a GPL dotata di sistemi di abbattimento inquinanti (catalizzatore trivalente) di una auto a benzina EURO 3, riesce tranquillamente a rispettare la normativa EURO 5 (al momento l'obbligo della normativa Euro 5 riguarda solamente i produttori. Invece, dal primo gennaio 2011, scatterà l'obbligo per la sola vendita di auto conformi alla nuova normativa).

A.2 Bombole di GPL: definizioni tecniche

- ◇ **Bombola:** recipiente cilindrico di metallo per contenere gas compressi o liquefatti.
- ◇ **Capacità geometrica (c.g.):** è la capacità utile di stoccaggio di un recipiente qualsiasi. E' espressa in litri di acqua, alla pressione atmosferica ed è punzonata sui contenitori.
- ◇ **Pressione di carica (P.C.):** è la pressione massima di riempimento, stabilita dalla norma, delle bombole destinate a contenere gas, miscele compresse e acetilene.

E' riferita alla temperatura di 15°C e si misura esclusivamente in bar. La pressione di carica per la capacità geometrica (solo per i gas compressi), fornisce grossolanamente la quantità di prodotto presente all'interno dei recipienti.

- ◇ **Tara:** nelle bombole destinate a contenere gas compressi e liquefatti la tara corrisponde al peso dei recipienti nudi (senza valvola e senza cappellotto).
- ◇ **Pressione di prova (P.p.):** è la pressione idraulica prescritta dalla norma nei collaudi di 1° costruzione e nelle revisioni periodiche dei recipienti. Per i gas e le miscele compresse è normalmente la pressione di carica.
- ◇ **Pressione d'esercizio (P.E.):** è la pressione di utilizzo del gas. Normalmente dipende dalla portata oraria, che non può essere superiore alla pressione di carica. La P.E. e la portata non possono essere alimentate direttamente dalla fonte del gas, ma attraverso un apparecchio a questo collegato, che fa da riduttore e regolatore della pressione. L'erogazione della pressione senza l'ausilio di questo apparecchio sarebbe incontrollata e pericolosa sotto il profilo della sicurezza.
- ◇ **Ogiva:** è la parte superiore delle bombole, evidente nelle bombole costituite da un solo pezzo, nella quale sono poste tutte le iscrizioni di legge.
- ◇ **Punzonatura:** marcatura praticata mediante punzone su superfici metalliche.
- ◇ **Punzone:** asta di acciaio duro recante all'estremità una sigla, una lettera, un numero o un segno particolare inciso, che serve per contrassegnare una superficie.
- ◇ **Peso di carica (P.d.c.):** è la quantità massima di gas liquefatto, espressa in Kg, che può contenere una bombola.

A.3 Sicurezza nei trasporti

A.3.1 Classificazione merci pericolose secondo la Dir 67/548/CE

Nelle note dell'Allegato I al D.Lgs. n. 334 si legge :

1. le sostanze e i preparati sono classificati in base alla normativa di recepimento delle seguenti direttive e modifiche e al loro attuale adeguamento al progresso tecnico: direttiva 67/548/CE del Consiglio, del 27 giugno 1967, concernente il ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari ed amministrative relative alla classificazione, all'imballaggio e all'etichettatura delle sostanze pericolose;

2. altre direttive per preparati pericolosi e antiparassitari

- Esplosivo: E
- Comburente: O
- Estremamente infiammabile: F+
- Facilmente infiammabile: F
- Infiammabile: R 10
- Altamente tossico: T+
- Tossico: T
- Nocivo: Xn
- Corrosivo: C
- Irritante: Xi
- Sensibilizzante: R 42 e/o R 43
- Cancerogeno: Carc. Cat. [1]
- Mutageno: Muta. Cat. [1]
- Tossico per il ciclo riproduttivo: Repr. Cat. [1]
- Pericoloso per l'ambiente: N e/o R 52, R 53, R 59.

A.3.2 Classificazione di merci pericolose per il trasporto

La classificazione ADR per il trasporto è la seguente:

- Classe 1: esplosivi
- Classe 2: gas compressi, gas liquefatti, gas liquefatti refrigerati e gas disciolti sotto P
- Classe 3: liquidi infiammabili
- Classe 4.1: solidi infiammabili

- Classe 4.2: materie soggette ad accensione spontanea
- Classe 4.3: materie che a contatto con l'acqua sviluppano gas infiammabili
- Classe 5.1: materie comburenti
- Classe 5.2: perossidi organici
- Classe 6.1: materie tossiche
- Classe 6.2: materie infettanti
- Classe 7: materie radioattive
- Classe 8: materie corrosive
- Classe 9: materie pericolose diverse

A.3.3 Codice Kemler

Il significato dei numeri di identificazione del pericolo è definito nell'ADR.

Il numero di identificazione del pericolo (detto anche come codice Kemler) è formato da due o tre cifre. In generale le cifre indicano i seguenti pericoli:

- 2 emanazione di gas risultanti da una pressione o da una reazione chimica;
- 3 infiammabilità di materie liquide (vapori) e gas o materia liquida autoriscaldante;
- 4 infiammabilità di materie solide o materia solida autoriscaldante;
- 5 combureenza (favorisce l'incendio);
- 6 tossicità o pericolo di infezione;
- 7 radioattività;
- 8 corrosività;
- 9 pericolo di violenta reazione spontanea.

Il raddoppio della cifra indica un'intensificazione del rischio specifico. Quando il rischio associato alla sostanza è adeguatamente indicato dalla singola cifra, essa è seguita da uno zero.

Se il numero di identificazione del pericolo è preceduto dalla lettera 'X' significa che la materia reagisce pericolosamente con l'acqua. Per tali materie l'acqua può essere utilizzata solo con l'approvazione di esperti.

Inoltre certe combinazioni di cifre hanno un significato speciale.

Il significato dei numeri utilizzati è presentato nel seguito.

- 20 gas asfissiante o che non presenta rischi complementari
- 22 gas liquefatto refrigerato, asfissiante
- 223 gas liquefatto refrigerato, infiammabile
- 225 gas liquefatto refrigerato, comburente (favorisce l'incendio)
- 23 gas infiammabile
- 239 gas infiammabile, può produrre spontaneamente una reazione violenta
- 25 gas comburente (favorisce l'incendio)
- 26 gas tossico
- 263 gas tossico e infiammabile
- 265 gas tossico e comburente (favorisce l'incendio)
- 268 gas tossico e corrosivo
- 30 materia liquida infiammabile (punto di infiammabilità da 23°C a 61°C, valori limite compresi)
- 30 materia liquida infiammabile o materia solida allo stato fuso con punto di infiammabilità superiore a 61°C, riscaldata a una temperatura uguale o superiore al suo punto di infiammabilità
- 30 materia liquida autoriscaldante
- 323 materia liquida infiammabile che reagisce con l'acqua emettendo gas infiammabili

- X323 materia liquida infiammabile che reagisce pericolosamente con l'acqua con sviluppo di gas infiammabili
- 33 materia liquida molto infiammabile (punto di infiammabilità inferiore a 23°C)
- 333 materia liquida piroforica (spontaneamente infiammabile)
- X333 materia liquida piroforica che reagisce pericolosamente con l'acqua
- 336 materia liquida molto infiammabile e tossica
- 338 materia liquida molto infiammabile e corrosiva
- X338 materia liquida molto infiammabile e corrosiva che reagisce pericolosamente con l'acqua
- 339 materia liquida molto infiammabile, può produrre spontaneamente una reazione violenta
- 36 materia liquida infiammabile (punto di infiammabilità da 23°C a 61°C, valori limite compresi) e tossica, o materia autoriscaldante e tossica
- 362 materia liquida infiammabile e tossica, che reagisce con l'acqua emettendo gas infiammabili
- X362 materia liquida infiammabile e tossica, che reagisce pericolosamente con l'acqua emettendo gas infiammabili
- 368 materia liquida infiammabile, tossica e corrosiva
- 38 materia liquida infiammabile (punto di infiammabilità da 23°C a 61°C, valori limite compresi) e corrosiva, o materia autoriscaldante e corrosiva
- 382 materia liquida infiammabile e corrosiva, che reagisce con l'acqua emettendo gas infiammabili
- X382 materia liquida infiammabile e corrosiva, che reagisce pericolosamente con l'acqua emettendo gas infiammabili
- 39 materia liquida infiammabile, che può produrre spontaneamente una reazione violenta
- 40 materia solida infiammabile o autoreagente o autoriscaldante

- 423 materia solida che reagisce con l'acqua con sviluppo di gas infiammabili
- X423 materia solida infiammabile, che reagisce pericolosamente con l'acqua con sviluppo di gas infiammabili
- 43 materia solida spontaneamente infiammabile (piroforica)
- 44 materia solida infiammabile che, a temperatura elevata, si trova allo stato fuso
- 446 materia solida intiammabile e tossica che, a temperatura elevata, si trova allo stato fuso
- 46 materia solida intiammabile o autoriscaldante, e tossica
- 462 materia solida tossica, che reagisce con l'acqua emettendo gas infiammabili
- X462 materia solida che reagisce pericolosamente con l'acqua sprigionando gas tossici
- 48 materia solida infiammabile o autoriscaldante, e corrosiva
- 482 materia solida corrosiva, che reagisce con l'acqua emettendo gas intiammabili
- X482 materia solida che reagisce pericolosamente con l'acqua sprigionando gas corrosivi
- 50 materia comburente (favorisce l'incendio)
- 539 perossido organico infiammabile
- 55 materia molto comburente (favorisce l'incendio)
- 556 materia molto comburente (favorisce l'incendio) e tossica
- 558 materia molto comburente (favorisce l'incendio) e corrosiva
- 559 materia molto comburente (favorisce l'incendio), può provocare spontaneamente una reazione violenta
- 56 materia comburente (favorisce l'incendio) e tossica
- 568 materia comburente (favorisce l'incendio), tossica e corrosiva
- 58 materia comburente (favorisce l'incendio) e corrosiva

- 59 materia comburente (favorisce l'incendio), può produrre spontaneamente una reazione violenta
- 60 materia tossica o con basso grado di tossicità
- 606 materia infettiva
- 623 materia tossica liquida, che reagisce con l'acqua sviluppando gas infiammabili
- 63 materia tossica e infiammabile (punto di infiammabilità da 23°C a 61°C. valori limite compresi)
- 638 materia tossica e infiammabile (punto di infiammabilità da 23°C a 61°C, valori limite compresi) e corrosiva

A.4 Approfondimento sul rilascio di GPL

A.4.1 Formazione della nube di GPL

I gas di petrolio liquefatti, così come quasi tutti i gas d'utilizzo industriale derivanti dal petrolio, allo stato gassoso hanno una densità superiore a quella della aria; ciò (in particolare l'effetto della gravità) complica notevolmente lo studio della dispersione del gas (specialmente nelle prime fasi) e la conseguente formazione della nube, che per il GPL assume la classica forma di **frittella piatta** (nube pancake shaped). Quando perciò si verificano rilasci di GPL a seguito di incidenti o di malfunzionamenti, per caratterizzare la dispersione è necessario tenere in conto gli scambi di energia e quantità di moto della nube (e del pennacchio che successivamente genererà la nube) con l'ambiente, oltre che di materia. In generale per quanto riguarda l'emissione di gas pesanti possono essere individuate quattro fasi fondamentali, in successione tra di loro:

1. formazione della nube con estensione verticale;
2. collasso della nube;
3. spargimento al suolo;
4. dispersione passiva¹.

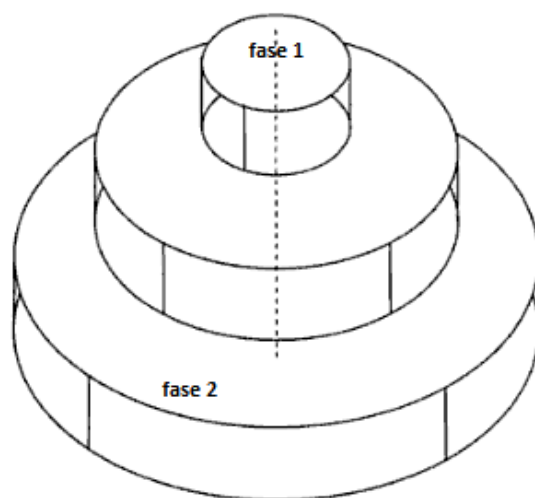


Figura A.1: Modello di rilascio istantaneo di una nube di gas denso [61].

Le quattro fasi sopra citate sono rappresentate, in maniera semplificata, nella Figura A.2. E' importante notare che la formazione della tipica nube piatta a forma di frittella che serpeggia rasoterra, trasportata dal vento, avviene solo in un secondo momento, quando la componente gravitazionale prevale sulla componente inerziale, ovvero quando la spinta del gas dovuta alla pressione iniziale del serbatoio (ove era stoccato) si affievolisce.

Concludendo si può dire che nelle fasi iniziali del rilascio anche il GPL forma un pennacchio (caratteristica tipica dei gas più leggeri dell'aria, come ad esempio il metano), che nei successivi istanti si trasforma in una nube piatta. Il tempo, abbastanza breve, che occorre per il collasso a terra della nube è spesso difficile da stimare in quanto è funzione di numerose variabili (quantità di rilascio, velocità e direzione del vento, pressione di rilascio, ecc...) indipendenti tra di loro, delle quali nella maggior parte dei casi è possibile solo fare una stima approssimativa.

¹Dopo le fasi preliminari, la nube densa mano a mano si diluisce; pertanto la differenza di densità tra nube e aria diviene meno marcata col passare del tempo e la nube tende a comportarsi come un contaminante passivo in atmosfera.

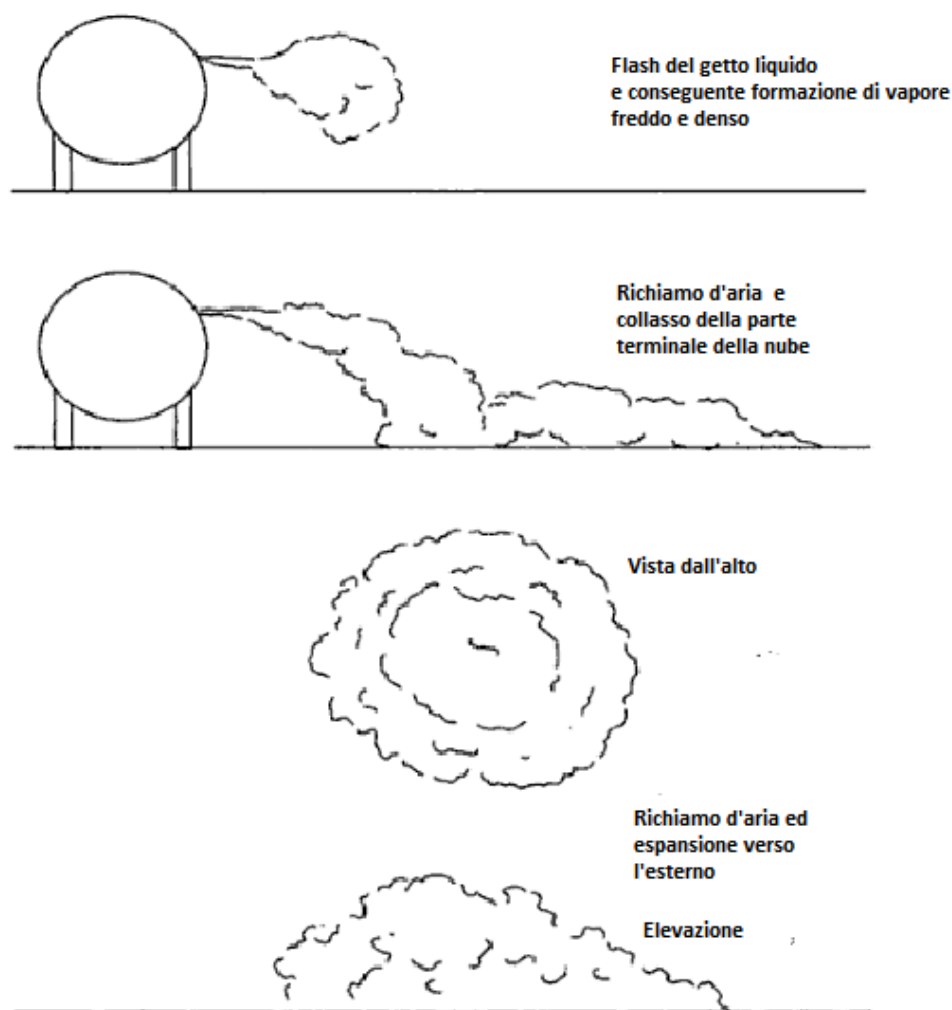


Figura A.2: Formazione di una nube densa [61].

A.4.2 Classi di stabilità di Pasquill

Pasquill (1974), nell'ambito dei suoi studi [56], ha descritto il comportamento dei vapori dispersi in atmosfera in funzione della turbolenza atmosferica. La quantità di turbolenza nell'ambiente ha infatti effetti significativi sulla risalita e dispersione delle sostanze gassose in atmosfera. Detta quantità può essere classificata in incrementi definiti, noti come '**classi di stabilità**' di Pasquill, suddivise in A, B, C, D, e F. La classe A denota le condizioni di maggior turbolenza o maggiore instabilità, mentre la classe F definisce le condizioni di maggior stabilità o minore turbolenza, come mostrato in Tabella A.1.

Tabella A.1: Classi di stabilità di Pasquill

Classe	Definizione
A	Condizioni estremamente instabili
B	Condizioni moderatamente instabili
C	Condizioni leggermente instabili
D	Condizioni di neutralità
E	Condizioni leggermente stabili
F	Condizioni moderatamente stabili
G	Estremamente stabile

Le classi di stabilità di Pasquill sono rappresentate (Tabella A.2) in funzione delle condizioni meteorologiche prevalenti, che tengono conto di:

- velocità del vento al suolo misurata a 10 metri di altezza rispetto alla superficie del suolo;
- radiazione solare diurna incidente o percentuale notturna di copertura nuvolosa.

Bisogna infatti considerare che identiche condizioni incidentali possono avere effetti differenti se avvengono di notte piuttosto che di giorno, se d'inverno o d'estate e se il punto di emissione è posizionato in pianura piuttosto che in una zona montuosa o costiera.

A.4.3 Sezione di rottura

Non vi è un consenso generale sulla sezione di rottura da utilizzare per il calcolo della portata scaricata. Alcuni dei suggerimenti proposti per il caso di rottura di tubazioni (si veda per maggiori dettagli P.J. Kayes, Manual of industrial hazard assessment techniques, World Bank, Washington D.C., 1985) sono i seguenti:

- 20% e 100% del diametro della tubazione;
- 2" e 4" per la rottura di una qualsiasi tubazione;
- 0.2", 1", 4" e 6" per tubazioni di diametro inferiore ai 6";
- a seconda del diametro della tubazione:

CARATTERISTICHE AMBIENTALI					
Velocità del vento al suolo		Radiazione solare diurna		Copertura nuvolosa notturna (nubi basse)	
[m/s]		Forte	Moderata	Debole	
< 2		A	A - B	B	coperto o > 50% ≤ 50% F
2 - 3		A - B	B	C	F
3 - 5		B	B - C	C	E
5 - 6		C	C - D	D	D
> 6		C	D	D	D

Tabella A.2: **Correlazione tra caratteristiche meteorologiche e classi di Pasquill.** La classe D (neutrale) si applica con cielo coperto da densa coltre nuvolosa, indipendentemente dalla velocità del vento sia di notte che di giorno e dalle condizioni del cielo durante l'ora precedente o seguente la notte. L'insolazione forte è riferita a giornate assolate di mezza estate; l'insolazione debole a condizioni similari a metà inverno. Le ore notturne coprono l'arco di tempo che va da 1 ora prima del tramonto ad 1 ora dopo l'alba.

- ✓ per tubazioni fino a 1.5" assumere un foro di 5 mm e 100% del diametro;
- ✓ per tubazioni da 2" a 6" assumere un foro di 5 mm, 25 mm e 100% del diametro;
- ✓ per tubazioni da 8" a 12" assumere un foro di 5 mm, 25 mm, 100 mm e 100% del diametro;

A.4.4 Flusso di non equilibrio

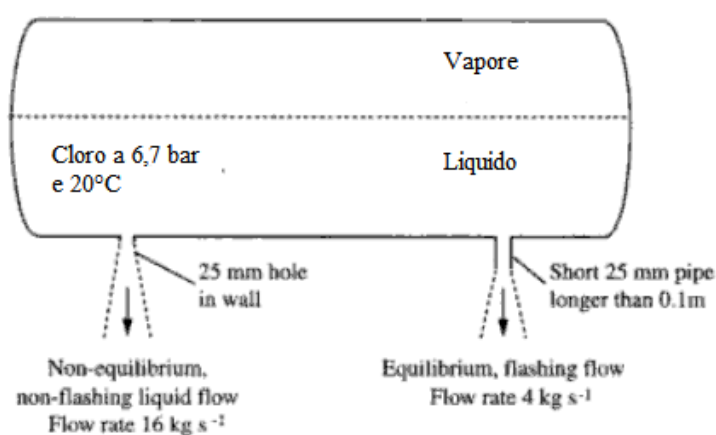


Figura A.3: Portata scaricata da un serbatoio di cloro

Un'ulteriore complicazione nella modellazione dei rilasci di un liquido stoccato al di sopra del suo punto di ebollizione atmosferico (e.g. GPL) è il fenomeno chiamato flusso di non equilibrio. Quando la pressione nel recipiente o nella tubazione scende al di sotto della pressione del punto di bolla, il liquido tende a bollire o evaporare parzialmente per flash. Ad esempio quando la caduta di pressione è causata dall'attrito in un tubo rotto, il vapore prodotto per flash causa strozzamento e limita il flusso. Tuttavia il flash richiede un tempo finito per compiersi, tempo nel quale vi è la nucleazione e la crescita delle bolle di vapore. Se il tempo di residenza nel tubo è molto breve allora può accadere che il liquido non abbia il tempo di realizzare il flash prima di essere scaricato all'esterno. In questo caso la portata scaricata è molto maggiore perchè non viene prodotto vapore che provochi lo strozzamento del flusso.

Quindi se prima dello scarico il liquido realizza il flash si ha un flusso d'equilibrio (portata scaricata minore), altrimenti quando il flash avviene all'esterno si ha un flusso di non equilibrio (portata scaricata maggiore).

Vari esperimenti hanno dimostrato che il liquido deve percorrere almeno una distanza di 10 cm perchè i tempi di residenza siano sufficientemente lunghi da far sì che si verifichi il flash, fino alla condizione di equilibrio, in seno all'apparecchiatura di contenimento danneggiata. Invece il flusso attraverso un foro, che offre al liquido un cammino caratteristico trascurabile, può essere modellato ipotizzando un flusso di non equilibrio (senza flash).

E' poi importante notare che la portata scaricata in caso di flusso d'equilibrio (ovvero con flash interno) è sensibilmente minore di quella relativa a flusso di non equilibrio (ovvero con flash esterno). Nel caso illustrato in Figura A.3 le portate sono rispettivamente 4 e 16 kg/s.

Nel caso di flusso di non equilibrio quindi il flusso di vapore prodotto all'esterno sarà maggiore, così come i rischi di incidente rilevante [61].

A.5 Onde di detonazione 3D

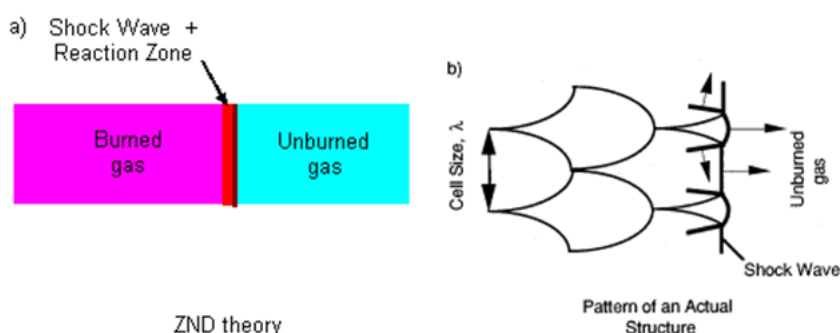


Figura A.4: Struttura e modello ZND (Zeldovich, Döring e von Neumann) di una struttura reale di un fronte di detonazione. La lunghezza caratteristica del modello cellulare, la dimensione delle celle, λ , è illustrato nella figura.

Una detonazione reale produce un'onda d'urto tridimensionale seguita da una zona di reazione. L'onda di compressione è costituita da segmenti curvi come in Fig. A.4.

APPENDICE **B**

MATFILE

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Lunghi, N. Mazzei: *Aspetti di sicurezza del GPL*. Riv. dei combustibili (2009), volume 63, fascicolo 3.
- [2] D.J. Cram, G.S. Hammond: *Organic Chemistry* McGraw-Hill Book Company.
- [3] C. Ortolani: CASI DI COMBUSTIONE ACCIDENTALE, Scoppio di una bombola di GPL, pag.261., Maggioli Editore (2007).
- [4] Federchimica, Assoliquidi: SCHEDA DI SICUREZZA GAS DI PETROLIO LIQUEFATTO (G.P.L.) (Data di compilazione: gennaio 2003; edizione agg.II- aprile 2006)
- [5] Composizione Miscele GPL - tratto da Ortolani C., Caratteristiche dei GPL.
- [6] P. Massolo , R. Gentilucci, *Gas compressi, liquefatti, disciolti e loro miscele*, Pirola Editore, Milano, 1981
- [7] Ing. Ilario Robusto: *Combustibili alternativi. Caratteristiche, tecnologie, criteri di scelta e prospettive*, Landirenzeo Corporate University, Capitolo 5.
- [8] G. Groppi: *Lezioni di Processi Chimici per l'energia e l'ambiente*.
- [9] Composizione e proprietà fisiche degli idrocarburi, Enciclopedia Treccani degli Idrocarburi, Volume I / Esplorazione, Produzione e Trasporto.
- [10] BASF e HUELS - IUCLID, Existing Chemicals - 1996
- [11] J.A. Moulijn, M. Make, A Van Diepen: *Chemical Process Technology* Wiley 2001.

- [12] H.F. COWARD, G.W. JONES: Limits of flammability of gases and vapors. US Bur. Mines Bull. 503, 1952
- [13] M.G. ZABETAKIS: Flammability characteristics of combustible gases and vapors. US Bur. Mines Bull. 627, 1965
- [14] W. PAYMAN, R.V. WHEELER: The effect of pressure on the limits of inflammability of mixtures of paraffin hydrocarbons with air. J. Chem. Soc., 123, 426 (1923)
- [15] J.E. HUSTAD, O.K. SONJU: Experimental studies of lower flammability limits of gases and mixtures of gases at elevated temperatures. Combust. Flame, 71, 283 (1988)
- [16] A. BARTKOWIAK, M.G. ZABETAKIS: Flammability limits of methane and ethane in chlorine at ambient and elevated temperatures and pressures. US Bur. Mines RI 5610, 1960
- [17] F. VAN DEN SCHOOR, F. VERPLAETSEN, J. BERGHMANS: The upper flammability limit of ethane, propane and n-butane in air at elevated pressures and temperatures. 11th Internat. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Praga, 2004, p. 2139
- [18] G.S. SCOTT, M.G. ZABETAKIS, A.L. FURNO: Flammability of mixtures of individual paraffin- hydrocarbon gases with air and added nitrogen at subatmospheric pressures. US Bur. Mines RI 4839, 1952
- [19] D. CONRAD, T. GREWER, B. HENTSCHEL, T. REDEKER: Development of a standard method for flammability limits of vapour-air mixtures. 7th Internat. Symp. Loss Prev. and Safety Promotion in the Process Industries. Taormina, 1992, p. 79-1
- [20] M. HATTWIG, H. STEEN: Handbook of Explosion Prevention and Protection. Wiley-VCH, Weinheim, 2004
- [21] L.G. BRITTON: Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations. AIChE/CCPS, New York, 1999
- [22] J.M. KUCHTA: Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining and fuel related industries. A Manual. US Bur. Mines Bull. 680, 1985

- [23] M.S. HSIEH, D.T.A. TOWNEND: An examination of the mechanism by which cool flames may give rise to normal flame. II. The inflammable ranges of higher paraffin hydrocarbons in air: the establishment of cool flame ranges at ordinary temperatures and high pressures. *J. Chem. Soc.*, 341 (1939)
- [24] F. VAN DEN SCHOOR, F. VERPLAETSEN, J. BERGHMANS: The upper flammability limit of ethane, propane and n-butane in air at elevated pressures and temperatures. 11th Internat. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Praga, 2004, p. 2139
- [25] G.W. JONES, R.E. KENNEDY: Inflammability of mixed gases: mixtures of methane, ethane, hydrogen and nitrogen. US Bur. Mines RI 3172, 1932
- [26] G.W. JONES, F.E. SCOTT: Extinction of propane and butane flames by dichlorodifluoromethane. US Bur. Mines RI 3908, 1946
- [27] T. VARGHESE, R.A. MATULA, C.W. SAVERY: Flammability limits of alkane-air diluent mixtures. *Combust. Flame*, 21, 131 (1973)
- [28] R.E. KENNEDY, I. SPOLAN, G.S. SCOTT: Explosibility of mixtures of propane, air, and carbon dioxide and of propane, air, and nitrogen at elevated pressures. US Bur. Mines RI 4812, 1951
- [29] H. SCHACKE, C.D. WALTHER: Avoidance of ignition by rendering ignition sources ineffective. 9th Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Ind., Barcellona, 1998, pag. 890
- [30] National Fire Protection Association: Explosion Venting, NFPA 68, Boston, 1984
- [31] J. NAGY, E.C. SEILER, J.W. CONN, H.C. VERAKIS: Explosion development in a spherical vessel. US Bur. Mines RI 7279 (1969)
- [32] G.W. JONES, R.E. KENNEDY: Extinction of propylene flames by diluting with nitrogen and
- [33] H. HOFFMANN, F.R. KAPPLER: Limiti di infiammabilità di miscele olefine-ossigeno-azoto in funzione della temperatura. *Chem. Ing. Techn.*, 47, 261 (1975)

- [34] A.A. PEKALSKI, H.P. SCHILDBERG, P.S.D. SMALLE- GANGE, S.M. LEMKOWITZ, J.F. ZEVENBERGEN, M. BRAITHWAITE, H.J. PASMAN: Determination of the explosion behaviour of methane and propene in air or oxygen at standard and elevated conditions. 11th Internat. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Praga, 2004, p. 2118
- [35] H.F. COWARD, G.W. JONES, C.G. DUNKLE, B.E. HESS: The explosibility of methane and natural gas. Investigation Bull. 30, 1926
- [36] J. NAGY, E.C. SEILER, J.W. CONN, H.C. VERAKIS: Explosion development in closed vessels. US Bur.Mines RI 7507, 1971
- [37] G. DALMAI: Investigations on the inflammability of methane-air and butane-air mixtures ignited by electric sparks. Combust. Flame, 2, 171 (1958)
- [38] G.W. JONES, R.E. KENNEDY: Limits of inflammability of natural gases containing high percentages of carbon dioxide and nitrogen. US Bur. Mines RI 3216, 1933
- [39] J. VAN HEININGEN: Influence of argon, nitrogen, helium, and carbon dioxide on the explosion limits of hydrogen, carbon monoxide, methane, and butane in air. Rec. Travaux Chim. Pays Bas, 55, 65 (1936)
- [40] National Fire Protection Association: Properties of Flammable Liquid, Gases. Solids, NFPA n. 325M, Boston, 1984
- [41] P. LAFFITTE, R. DELBOURGO: Ignition by condenser sparks. Region of flammability of ethane, propane, n-butane and n-pentane. 4th Symp. (Internat.) on Combustion, Williams and Wilkins Co., Baltimora, 1953, p. 114
- [42] A. EGERTON, J. POWLING: The limits of flame propagation at atmospheric pressure. Proc. Roy. Soc., 193, 172 (1948)
- [43] G.W. JONES, G.S. SCOTT: Extinction of isobutane flames by carbon dioxide and nitrogen. US Bur. Mines RI 4095, 1947
- [44] A.G. WHITE: Limits for the propagation of flame in inflammable gas-air mixtures. I. Mixtures of air and one gas at the ordinary temperature and pressure. J. Chem. Soc., 124, 2387 (1924)
- [45] D.P. MISHRA, A. RAHMAN: An experimental study of flammability limits of LPG-air mixtures. Fuel, 82, 863 (2003)

- [46] H. LECHATELIER: Note sur le dosage du grisou par les limites d'inflammabilité. Ann. Mines, 19, 388 (1891)
- [47] P.Cardillo, Caratteristiche di infiammabilità dei gas di petrolio liquefatti. Riv. Combustibili (2005), volume 59, fascicolo 5.
- [48] L'AUTORITA' GARANTE DELLA CONCORRENZA E DEL MERCATO, Relatore Professor Fabio Gubbio: Indagine conoscitiva IC8 - SETTORE DEI GAS DI PETROLIO LIQUEFATTI PER RISCALDAMENTO, Provvedimenti: n. 1104 del 28/04/1993 - Apertura indagine conoscitiva e - n. 2853 del 02/03/1995 - Chiusura indagine conoscitiva.
- [49] Ministero dello Sviluppo Economico, Dipartimento per l'Energia, Direzione Generale per la sicurezza dell'approvvigionamento e le infrastrutture energetiche DIV. VII - Statistiche ed analisi energetiche e minerarie, BILANCIO ENERGETICO NAZIONALE 2008.
- [50] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Supervisione Ivo Allegrini, Coordinamento scientifico Lorenzo Bertuccio, Gruppo di lavoro Antonio Parenti, Anna Maria Atzori, Giuseppe Giannone: Benefici Ambientali del GPL per autotrazione: Analisi tecnica di politiche integrate.
- [51] Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività OSSERVATORIO PER IL SETTORE CHIMICO, IL SETTORE DEL GPL IN ITALIA, dicembre 2001.
- [52] R. Fanelli, R. Carrara: Guida al trasporto di sostanze pericolose, Fondazione Lombardia per l'ambiente, Milano, 1999
- [53] Assogasliquidi, Linee guida per la security nel Trasporto STRADALE di gas DI PETROLIO LIQUEFATTI (GPL), maggio 2005, rev.I/06.05
- [54] Assochimica, Manuale per gli autisti addetti al rifornimento di piccoli serbatoi di GPL, 2000.
- [55] K. Gulan: *Unconfined Vapor Cloud Explosions*, The Institution of Chemical Engineers (1979). In
- [56] F. Pasquill: *Atmospheric Diffusion*, 2nd Edition (Ellis Horwood, 1974).

- [57] A.Pelliccioni, C.Gariazzo: 'Ricerca modellistica ed applicazione per la valutazione delle conseguenze negli impianti a rischio di incidente rilevante', ISPESL, DIPIA, Via Fontana Candida 1, Monteporzio Catone (RM), 00040, Italia.
- [58] Zeeuwen, J.P., Wingerden, C.J.M. van and Dauwe, R.M. (1983): Experimental investigation into the blast effect produced by unconfined vapour cloud explosions. 4th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Pergamon Press, London, UK, pp. D20-D29.
- [59] Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke, Kees van Wingerden: Gas Explosion Handbook, (1997), ELSEVIER Journal of Hazardous Materials, pag. 1 - 150.
- [60] F.P.Lees: Loss prevention in the process industries, hazard identification, assessment and control, Volume 2, pag. 129-180, 3rd Ed. (1996)
- [61] G. Wells: Major Hazards and their management, Institution of Chemical Engineers (IChem, 1997).
- [62] Italia. Decreto Ministeriale 15 maggio 1996. Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di Gas e Petrolio Liquefatto (GPL). Gazzetta Ufficiale n. 159, 9 luglio 1996.
- [63] G. De Gennaro: QUINTA RACCOLTA DI CONTRIBUTI TECNICI, NORMATIVI E DI ATTUALITÀ SULLA SALUTE E SICUREZZA DEL LAVORO, Sequenze incidentali tipo a seguito di rilasci di GPL, ISPESL, Dipartimento territoriale di Bari, (2010).
- [64] M. Van Aerde, A. Stewart e F.F. Saccomanno: Estimating the impacts of L.P.G. spills during transportation accidents, Journal of Hazardous Materials, 20 (1988), pag. 375-392.
- [65] R. Rota: Modellazione delle conseguenze di incidenti industriali, (2004), Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica G. Natta. Politecnico di Milano.
- [66] C.J.H. Van der Bosch, N.J. Duijm, 'Outflow and spray release', in: C.J.H. Van der Bosch, R.A.M.P. Weterings (Eds.), *Methods for the Calculation of Physical Effects due to Releases of Hazardous Materials (Liquid and Gases)*, Netherlands, (2005).

- [67] S. Brambilla, D. Manca: The Viareggio LPG railway accident: Event reconstruction and modeling, *Journal of Hazardous Materials* 182, (16 giugno 2010), pag. 346-357.
- [68] S.R. Hanna, P.J. Drivas: *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1987.
- [69] R. Rota: *Detonazioni ed esplosioni*, capitolo 7.2, VOLUME V / STRUMENTI, pag.431-448, Enciclopedia Treccani Idrocarburi.
- [70] R. Rota: *Incendi*, capitolo 7.2, VOLUME V / STRUMENTI, pag.449-467, Enciclopedia Treccani Idrocarburi.
- [71] H. Giesbrecht: EVALUATION OF VAPOUR CLOUD EXPLOSIONS BY DAMAGE ANALYSIS, *Journal of Hazardous Materials*, 17 (1988), pag. 247-257.
- [72] B.J. WIEKEMA: VAPOUR CLOUD EXPLOSIONS - AN ANALYSIS BASED ON ACCIDENTS PART I, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 8 (1984) pag. 295-311.
- [73] B.J. WIEKEMA, VAPOR CLOUD EXPLOSION MODEL, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 3 (1980) pag. 221-232.
- [74] R.A. STREHLOW: Unconfined Vapour Cloud Explosions. An overview, 14th Symposium (International) on Combustion (1972). University Park, Pennsylvania, USA, The Combustion Institute, Pittsburg, 1973.
- [75] J. E. S. VENART: 'FLIXBOROUGH: THE EXPLOSION AND ITS AFTER-MATH', *Trans IChemE, Part B* (March 2004) Process Safety and Environmental Protection, 82(B2), pag. 105-127.
- [76] Center for Chemical Process Safety: *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, 2 nd edition AIChE, New York, 2000.
- [77] B.Mazzarotta: Termofluidodinamica degli Incidenti, Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione Industriale, Università di Roma 'La Sapienza' (1993).
- [78] S. Patej: Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques accidentels (DRA-35), *Feu torche*, $\Omega-8$, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) (2003).

-
- [79] Giovanni Manzini: *Viareggio-Esplosione del gpl fuoriuscito dalla cisterna di un convoglio ferroviario*, Il giornale dell'Ingegnere, (luglio 2009).
- [80] *Conversazione privata con l'Ing. Mazzei*, Stazione Sperimentale dei Combustibili, San Donato (2010).
- [81] *Conversazione privata con l'Ing. D. Manca*, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica 'Giulio Natta', Milano (2010).

INDICE ANALITICO

ADN, 89
ADR, 89, 90
ANSF, 96

BLEVE, 101
Bombola, 63, 84, 215

Capacità geometrica, 64, 66, 215
Classi di stabilità, 224
Coefficiente di riempimento, 13, 63, 84

Energia minima d'accensione, 116
ERA, 95
Evaporazione da pozza, 105
Evaporazione flash, 102, 105

Fireball, 101
Flash Fire, 100

Limiti d'inflammabilità, 40, 115

Numero di Kemler, 91, 218

Ogiva, 64, 216

Pool Fire, 101
Pressione di carica, 64, 215
Pressione di prova, 64, 86, 216

RFI, 96
RID, 89

UVCE, 101