

CADUTA DI UN AEREO SU UN SERBATOIO DI GNL IN MARE

Gianni Petrangeli, Università di Pisa
Via C. Maes 53 00162 Roma, Italia

SOMMARIO

Lo scopo del lavoro è di studiare le possibili conseguenze dell'urto di un grosso aereo di linea su di un terminale marino di Gas Naturale Liquefatto (GNL). Si suppone che il terminale sia ormeggiato a circa 12 miglia marine (circa 22 km) dalle più vicine coste abitate. Le conseguenze di interesse sono i possibili danni agli abitanti più vicini ed al personale del terminale. Le ipotesi relative ai fenomeni distruttivi dell'evento durante e dopo l'urto ricalcano le ipotesi usuali per eventi di questo genere riferiti ad impianti nucleari. In particolare si suppone che si inneschi immediatamente l'incendio del GNL fuoriuscito. Sono state raggiunte le seguenti conclusioni: -la potenza irradiata sulla costa è al di sotto del limite di sopportabilità senza danni anche temporanei delle persone; -il vento indotto dall'esteso incendio è trascurabile (sempre sulla costa); -si può presumere che la nave-terminale, se correttamente realizzata con strutture compartimentate, possa continuare a galleggiare almeno per il tempo necessario al personale per mettersi in salvo in opportune strutture di rifugio che si suppongono appositamente previste nel progetto della nave; -il rifugio del personale dovrebbe essere fattibile data la durata prevista dell'incendio; -è necessario che le azioni di emergenza che il personale deve intraprendere in caso di urto aereo o di altro impatto considerato, siano accuratamente studiate e incorporate nelle procedure di emergenza del terminale. E' stato inoltre esaminato il caso improbabile di un urto aereo o fenomeno simile senza contemporaneo incendio. In questo ipotetico caso, le distanze a cui può arrivare una nube di miscela di gas combustibile ed aria a concentrazioni infiammabili, potrebbero essere notevolmente maggiori che nel caso sopra esaminato. Non si prevedono tuttavia danni importanti alle persone sulla costa anche in assenza di qualsiasi provvedimento di emergenza. Anche questo caso dovrebbe essere accuratamente studiato, per completezza, in sede di stesura di procedure di emergenza senza escludere la manovra di ignizione volontaria della nube gassosa per limitarne lo spostamento verso costa.

1.0 Introduzione: andamento dell'incidente

Si suppone che il terminale galleggiante (nave) sia ormeggiato a circa 22 chilometri dalla costa.

Si suppone che un grosso aeroplano di linea (ad esempio un Boeing 767 o equivalente) precipiti sul terminale galleggiante (Figura 1).



Figura 1. Possibilità di impatto di un aereo di linea sul terminale

La caduta può avvenire in picchiata o in corso di ammaraggio dell'aereo; c'è da dire che ambedue le manovre sono considerate di difficile esecuzione. Si suppone che la velocità di impatto sia dell'ordine dei 200 m/s e che pertanto sia credibile la perforazione di uno o due serbatoi per urto.

E' possibile che il galleggiamento della nave non sia compromesso.

Nella caduta di un aereo, l'incendio del suo combustibile è una delle conseguenze immediate dell'impatto [1, 2, 3] e pertanto anche il gas liquefatto fuoriuscito dal serbatoio comincerà a bruciare aumentando la velocità di evaporazione del liquido. Altre conseguenze sono il carico localizzato nel punto di impatto e lo scuotimento generale della struttura impattata.

2.0 Calcolo dello spandimento del liquido sul mare

Si suppone ragionevolmente che lo spandimento del liquido sull'acqua avvenga per gravità ("slumping") mentre la quantità di liquido diminuisce per l'evaporazione. Non si tiene conto dell'effetto di rallentamento della pozza dovuto al congelamento temporaneo parziale della superficie dell'acqua. Non si ritiene comunque credibile la formazione di uno strato compatto di ghiaccio al di sotto del gas liquefatto [4] nel caso di sversamento in acqua aperta. Si suppone poi, in questa valutazione, che il vento sia assente o di piccola entità. Si trascura inoltre la pendenza verso l'esterno della superficie superiore della pozza, importante solo nei primi istanti dopo il versamento.

La Figura 2 rappresenta schematicamente il fenomeno.

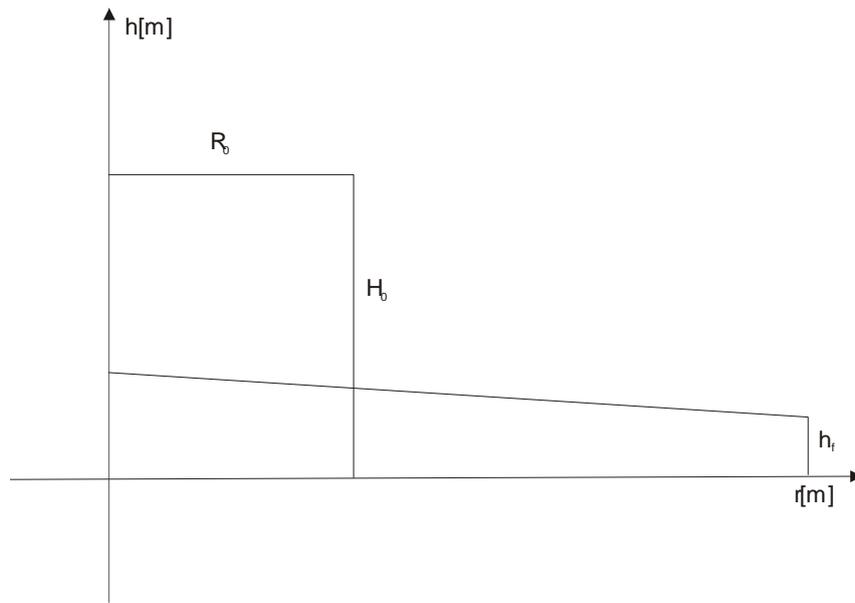


Figura 2. Spandimento del GNL sull'acqua

Si suppone che la velocità di avanzamento del fronte circolare di GNL sull'acqua sia data da [4, 15.172] (Modello di Van Ulden)

$$u_f = c_E \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} g h_f \right)^{1/2} \text{ m/s} \quad (1)$$

Dove u_f -velocità di spandimento; c_E -costante; ρ_1 , ρ_2 - densità del GNL e dell'aria; g -accelerazione di gravità; h_f -altezza del fronte di GNL;

Per c_E Van Ulden suggerisce il valore 1 ed anche il rapporto di densità è uguale a circa 1 per la forte differenza di densità fra gas liquefatto ed aria. Con ciò la (1) è identica, a meno di un fattore $2^{1/2} = 1.4$, all'espressione fornita dalla legge di Bernoulli per una caduta libera in presenza di gravità, $u = \sqrt{2gh}$.

Altre relazioni che regolano il fenomeno, con significato ovvio dei simboli, sono (trascurando l'effetto della pendenza, debole salvo che in un primo periodo, della superficie superiore della pozza in espansione)

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= u_f(t) \\ V(t) &= \pi \cdot r^2(t) \cdot h_f(t) \\ \frac{dV}{dt} &= -\pi \cdot r^2(t) \cdot u_e \end{aligned} \quad (2)$$

Dove r - raggio della pozza, assunta di forma circolare; t -tempo; $V(t)$ -volume del GNL residuo al tempo t ; u_e -velocità di evaporazione del GNL

La velocità di evaporazione della pozza u_e (velocità di abbassamento del livello liquido) è assunta, per GNL, [4,16.202], pari a 0.66 cm/min, cioè 10^{-4} m/s. Tale quantità può essere stimata anche in valori più alti, fino a $3 \cdot 10^{-4}$ m/s [5]: l'assunzione di un valore basso è, comunque, prudentiale in questo caso perché allunga il tempo di evaporazione ed aumenta il raggio massimo raggiunto dalla pozza prima di evaporare e bruciare completamente.

Il sistema di equazioni (1) e (2) si presta ad una soluzione a passo a passo per ottenere le grandezze di interesse ad un istante 2 in funzione del valore delle stesse all'istante 1, secondo lo schema mostrato in Figura 3.

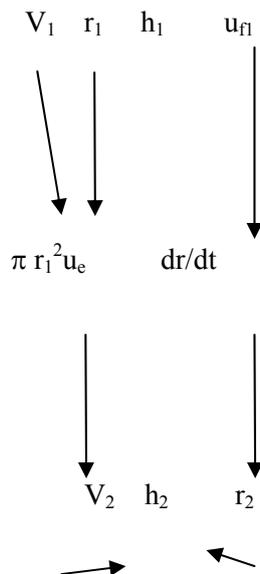


Figura 3. Schema di calcolo a passo a passo dello spandimento della pozza di GNL

Tale calcolo si esegue rapidamente con un foglio Excel. Nel caso attuale, con un cilindro iniziale di gas liquido di raggio 24m e altezza 33m (per un volume utile di circa 60000 m³ pari a circa la metà del totale massimo contenuto del terminale, assunto pari a 130000 m³) si ottengono gli andamenti temporali della Figura 4 (1, 2 e 3)

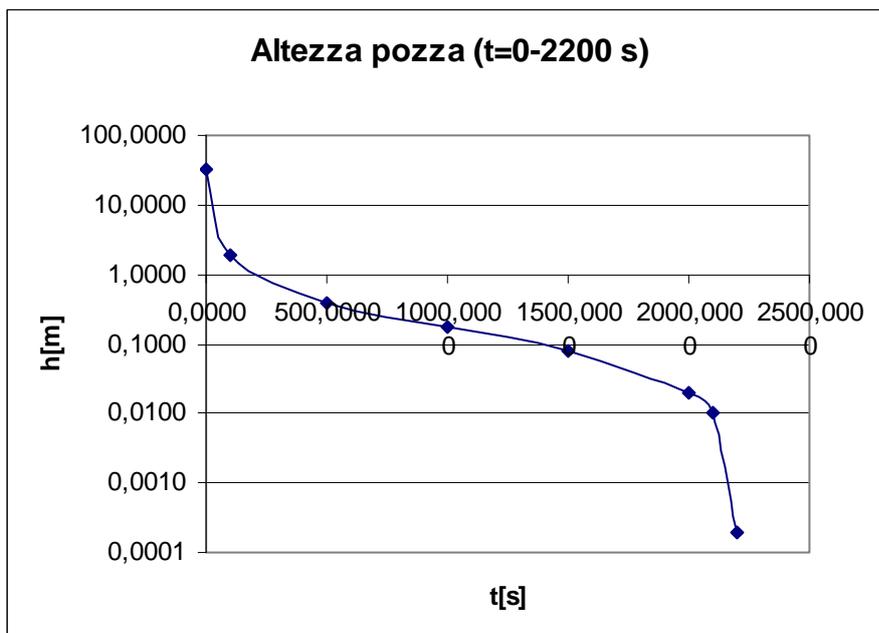


Figura 4.1

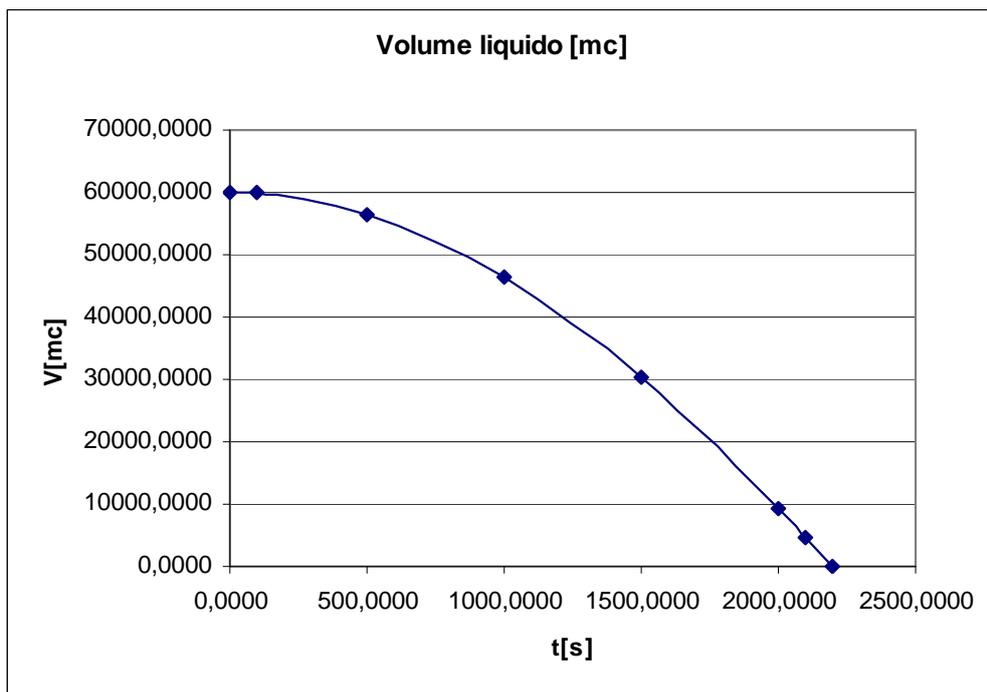


Figura 4.2

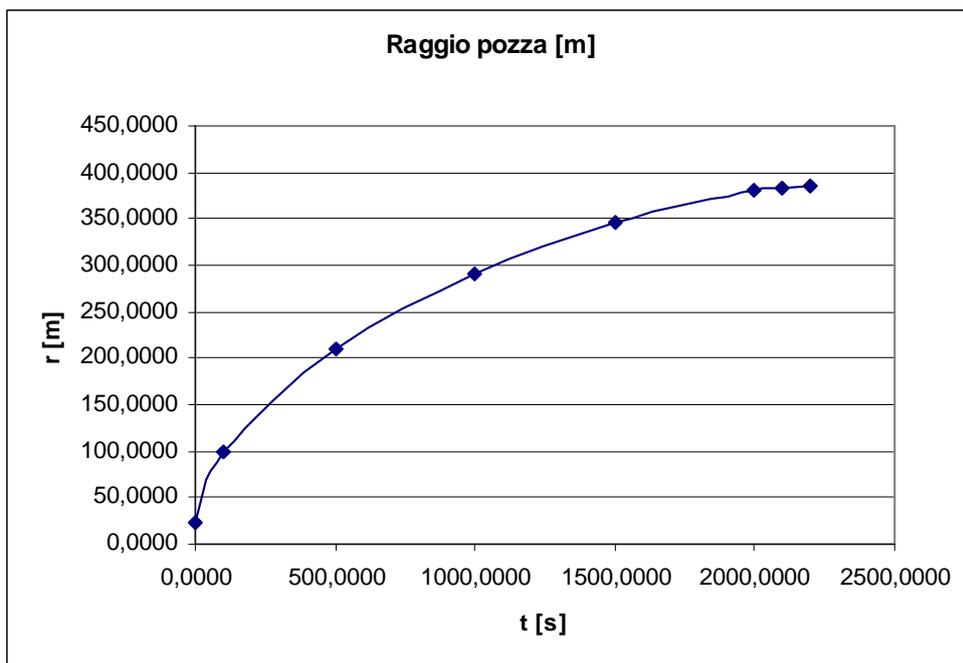


Figura 4.3

Figura 4 (1,2 e 3). Andamento temporale dello spandimento della pozza di GNL sul mare (ignizione immediata)

Quindi la completa evaporazione della pozza avviene in circa 2200 s ed il raggio massimo raggiunto è di circa 400 m.

La valutazione precedente non tiene conto del fatto che l'altezza del bordo esterno della pozza non può arrivare a zero a causa della presenza di una tensione superficiale del GNL a contatto con l'acqua-ghiaccio. La Figura 5 mostra una sezione del bordo esterno della pozza e la relativa azione della tensione superficiale che è controbilanciata dalla pressione idrostatica del GNL al bordo

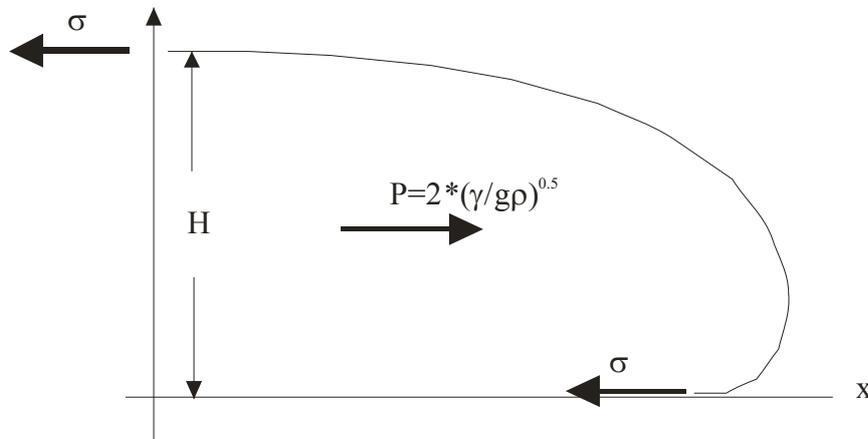


Figura 5. Sezione del bordo della pozza

Dove σ - tensione superficiale ; H- altezza della pozza al bordo; p- pressione idrostatica del GNL al bordo; γ -peso specifico del GNL (415 kg/m^3); g- accelerazione di gravità; ρ - densità del GNL.

Per σ assunto uguale a $1.1 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$ [6], si ha che l'altezza limite H al bordo è di 2.4 mm. Dalla Figura 4.1 appare che l'importanza del considerare la tensione superficiale è modesta.

3. Calcolo del caso ipotetico di assenza di ignizione

A scopo conoscitivo è stato anche valutato il caso di assenza di ignizione dopo il versamento in mare del GNL. In tale caso è interessante conoscere quale è la massima distanza alla quale viene raggiunto il limite inferiore di infiammabilità della miscela gas evaporato-aria (LFL, "low flammability limit"). La valutazione è stata fatta stimando la velocità di evaporazione della pozza per effetto del calore trasmesso dall'acqua e (in minore quantità) dall'aria sovrastante.

Considerando possibile anche la formazione di uno strato continuo di ghiaccio sotto alla pozza (cosa, come già detto ritenuta non credibile per versamenti di GNL in acque aperte e non in spazi limitati come vasche di raccolta di perdite), la velocità di evaporazione della pozza risulta dalla seguente formula

$$u_e = [(T_m - T_l) \cdot h_w + (T_a - T_l) \cdot h_a] \cdot \frac{v_l}{h_{fg}} \quad (3)$$

Dove T_m, T_a, T_l - sono temperature in gradi Kelvin del mare, dell'aria e del GNL; h_w - il coefficiente di trasmissione del calore per convezione dall'acqua di mare alla superficie inferiore della pozza; h_a - il coefficiente di trasmissione del calore per convezione dall'aria alla superficie superiore della pozza; v_l - il volume specifico del GNL; h_{fg} - il calore di evaporazione del GNL.

Il coefficiente di trasmissione h_w è poi dato da

$$h_w = \frac{1}{\frac{1}{h_{wl}} + \frac{s_g}{k_w}} \quad (4)$$

Dove h_{wl} - coefficiente di trasmissione del calore per convezione dall'acqua liquida alla superficie inferiore del ghiaccio; s_g - lo spessore di ghiaccio; k_w - il coefficiente di conducibilità termica del ghiaccio.

I valori assunti per le varie quantità sono:

$T_m = T_a = 288 \text{ °K}$, $h_{wl} = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ Kcal/m}^2\text{s °K}$, $s_g = 3.4 \text{ cm}$, $k_w = 4.8 \cdot 10^{-4}$, $h_a = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal/m}^2\text{s °K}$, $v_l = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_{fg} = 121.9 \text{ Kcal/kg}$. Lo spessore di ghiaccio di 3.4 cm è stato scelto in modo che sulla superficie inferiore del ghiaccio la temperatura sia di circa 0 °C cosicché lo strato non aumenta oltre di spessore. Per tale spessore del ghiaccio risulta $h_w = 8.9 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal/m}^2\text{s °K}$, mentre senza ghiaccio si ha

$h_w=2.4 \cdot 10^{-2} \text{Kcal/m}^2\text{s}^\circ\text{K}$. La corrispondente velocità di evaporazione u_1 è di $3.6 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$ contro un massimo di $3 \cdot 10^{-4} \text{m/s}$ del caso con incendio della pozza. Il caso senza ghiaccio dà una u_1 di $8.5 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$. Il calcolo delle varie quantità di interesse per il fenomeno dello spandimento in funzione del tempo (altezza della pozza, suo volume residuo e suo raggio) procede come nel caso con ignizione immediata sopra descritto ma con le velocità di evaporazione del GNL appropriate. La Figura 6 (1,2 e 3) dà le grandezze di interesse per il caso di spandimento con ghiaccio. Il caso di spandimento senza ghiaccio dà praticamente gli stessi risultati del caso con ignizione immediata e valore basso della velocità di evaporazione ($u_1=10^{-4} \text{m/s}$) rappresentati dalle Figure 4 (1,2 e 3).

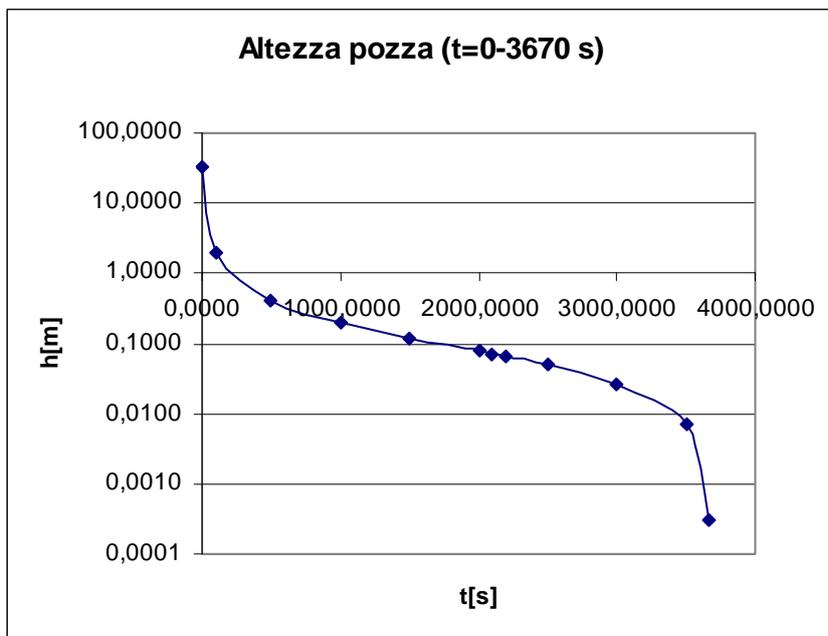


Figura 6.1

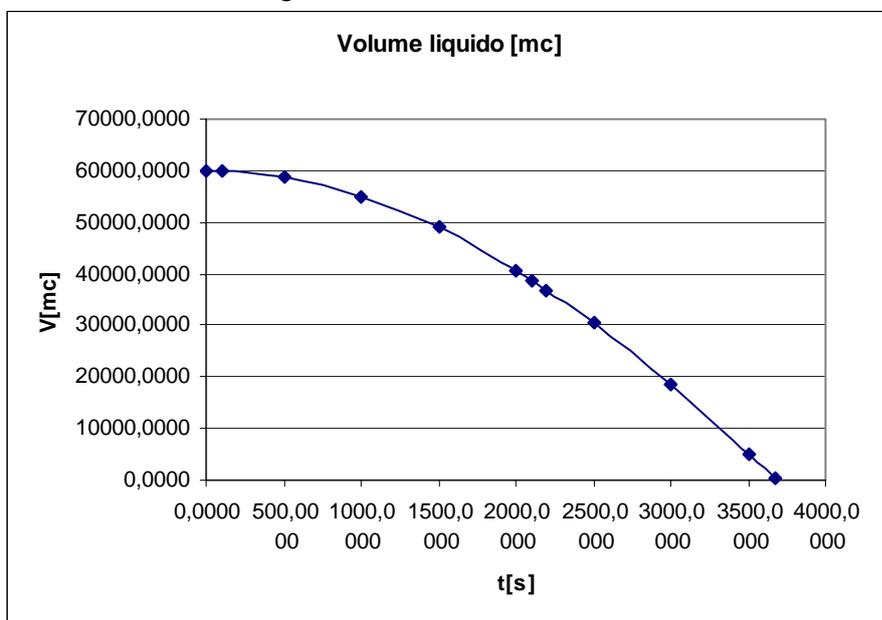


Figura 6.2

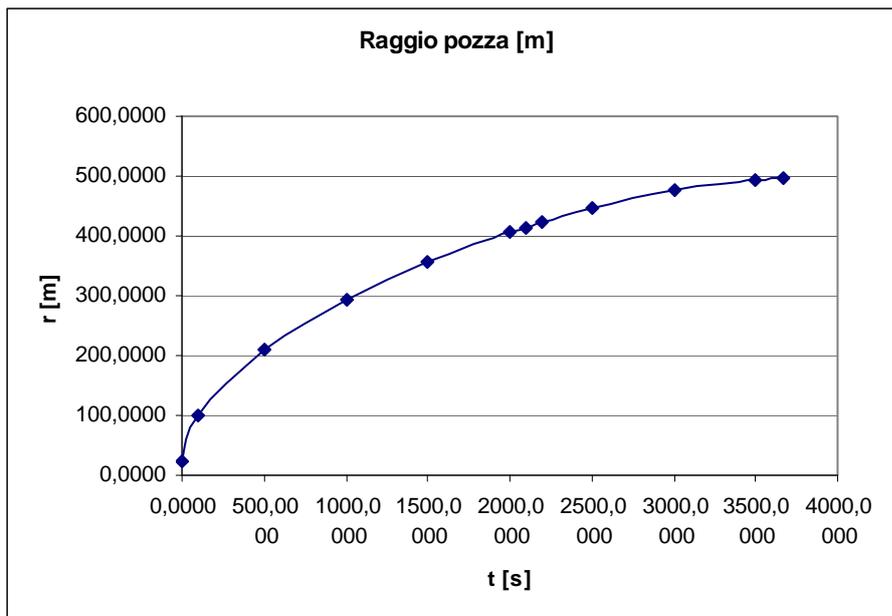


Figura 6.3

Figura 6 (1,2 e 3)- Andamento temporale dello spandimento della pozza di GNL sul mare (senza ignizione e con formazione di uno strato di ghiaccio sul mare)

Sulla base della Figura 6 si può ora calcolare la distanza a cui può arrivare il gas con concentrazione superiore al LFL. Si userà la pratica in campo nucleare per il calcolo delle concentrazioni a distanza dal punto di rilascio per diffusione atmosferica. Per una sorgente estesa come in questo caso (pozza di circa 500 m di diametro) è normale usare il metodo di Pasquill per la diffusione ed il concetto di arretramento della sorgente per la simulazione dell'effetto di una sorgente non puntiforme[1, 2]. L'arretramento della sorgente consiste nel considerare un punto di rilascio fittizio ad una distanza dal centro della sorgente estesa nella direzione opposta al vento che dia una larghezza di pennacchio pari alle dimensioni laterali della sorgente estesa. La larghezza del pennacchio è qui definita come la dimensione laterale di esso per cui si ha una concentrazione di contaminante pari ad una piccola frazione (10 %) della concentrazione sull'asse del pennacchio. Le condizioni atmosferiche di Pasquill prudenti ma realistiche dato il sito marino sarebbero la condizione D con 5 m/s di vento [1, 2]; qui, comunque, saranno ipotizzate condizioni ancora più stabili (categoria F con 2 m/s di vento), proprie di una condizione di inversione atmosferica con probabile nebbia bassa, quindi poco compatibili con le tipiche brezze marine e con un evento di impatto aereo intenzionale. Per le condizioni F con 2 m/s si ha un arretramento di circa 8 km per una dimensione laterale di sorgente pari a $500 \cdot 2 = 1000$ m. Per la condizione D con 5 m/s si avrebbe un arretramento di circa 4 km.

Il limite inferiore di infiammabilità è per il metano una concentrazione volumica del 5% in aria che corrisponde a 36 g/m^3 di gas.

La concentrazione in peso di gas, $C_g(x)$, ad una certa distanza x dal punto di rilascio virtuale (cioè tenuto conto dell'arretramento della sorgente) è data da

$$C_g(x) = \chi(x) \cdot G_g$$

Ove $\chi(x)$ è la concentrazione unitaria di Pasquill alla distanza x dal punto virtuale di rilascio espressa in $[\text{g/m}^3]$ per $[\text{g/s}]$ di rilascio di gas e G_g è il rilascio di gas per unità di tempo, $[\text{g/s}]$.

A sua volta G_g è dato dal prodotto delle superficie evaporante per la velocità di evaporazione del gas. Per una pozza di 500 m di diametro ed una velocità di evaporazione massima (senza formazione di ghiaccio) di $8.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, si ha un G_g di $8.8 \cdot 10^6 \text{ g/s}$ di gas. La distanza corrispondente al LFL è, per la condizione F 2 m/s, di 23 km dal punto di rilascio virtuale e quindi, tenuto conto dell'arretramento di 8 km, di 15 km dal centro della pozza. Il LFL si raggiunge quindi a circa 7 km dalla costa più vicina. Nella valutazione precedente si è supposto, come è in realtà, che il tempo perché la pozza si estenda fino al raggio di 500m (circa 1 ora) sia piccolo di fronte al tempo di diffusione successiva fino a raggiungere il LFL (circa 3 ore).

Va citato il fatto che il Laboratorio Sandia [5] ha calcolato una distanza massima a cui si raggiungerebbe il limite inferiore di infiammabilità del gas evaporato pari a circa 3.6 km dal centro della pozza, da confrontare con gli 8 km qui valutati. Nonostante le condizioni atmosferiche ipotizzate siano simili a quelle qui adottate si ha una differenza di più di un fattore 2 sulle distanze calcolate, il che è imputabile al metodo di calcolo usato che è diverso per i due casi. Differenze di quest'ordine di grandezza fra vari calcoli di diffusione non sono insoliti.

4. Altri fenomeni connessi

L'effetto del vento potrebbe aumentare la distanza a cui arriva la pozza (e la fiamma) prima che il gas liquefatto si esaurisca. Di solito si assume [7] che la velocità con cui il vento sposta una pozza galleggiante sul mare sia del 3% della velocità del vento a 10 m di altezza, V_{10} . Anche con un vento forza 7 Beaufort ($B=7$) di

$$v=0.836B^{3/2}=15 \text{ m/s}$$

in 3680 secondi (caso peggiore fra quelli sopra ipotizzati) la distanza aggiuntiva della pozza dal punto di rilascio sarebbe di

$$0.03 \times 15 \times 3680 = 1.656 \text{ m}$$

quindi il combustibile sarebbe sempre ben lontano da terra.

C'è poi da considerare il vento prodotto dall'incendio stesso, in quanto esso è piuttosto esteso. Per un grande incendio (chilometri di raggio, lunga durata) si può stimare [8] che al massimo la velocità del vento generato dall'incendio sia di 40 m/s che corrisponde a un vento forza 12 (uragano). Questi venti, difficilmente raggiungibili nei casi qui considerati, sarebbero rivolti verso il centro della pozza e pertanto non comporterebbero uno spostamento di essa. Essi sono importanti solo per gli effetti su natanti vicini.

Un'altra valutazione che si può fare è quella relativa al vento provocato dall'aria trascinata nella fiamma dell'incendio. Il peso di aria trascinata nella fiamma per grossi incendi è stimato a circa 5 volte il valore stechiometrico [9] e pertanto, nel nostro caso, eseguiti i calcoli, si avrebbe un vento di una frazione di m/s, quindi molto debole.

La stima del vento provocato andrebbe approfondita, ma quanto sopra detto sconsiglia anche per questa ragione di minore importanza rispetto all'irraggiamento della fiamma, di avvicinarsi con natanti o mezzi aerei al terminale prima che sia terminato l'incendio.

5. Valutazione delle conseguenze esterne

L'irraggiamento termico è l'agente più danneggiante a distanza del fenomeno.

Per una valutazione, si può assumere che per il GNL, l'emissione termica sia pari a 200 kW/m^2 [4, 16,206]. Per il caso con ignizione immediata, a distanza di 22 km ed assumendo una distanza massima della superficie di fiamma dal terminale di 1000 m, il valore di energia radiante a terra sarà al massimo (vale la legge di attenuazione con il quadrato della distanza) $200/22^2=200/484= 0.4 \text{ kW/m}^2$; tale valore si deve confrontare con le seguenti soglie di danno

Inizio letalità, 7 kW/m^2

Lesioni reversibili, 3 kW/m^2 (accettato anche 5 kW/m^2)

Danni alle strutture 12.5 kW/m^2

Non c'è quindi alcun danno a persone o a cose; chi si trovasse sulla riva avvertirebbe comunque un aumento di esposizione al calore irraggiato (l'irraggiamento del sole è mediamente di 1 kW/m^2).

A volte si è scritto che l'energia della combustione di un serbatoio di un terminale sarebbe pari a molte bombe atomiche tipo Hiroshima, volendo far capire che il serbatoio è altrettanto pericoloso. Questo avvicinamento, comunque, è del tutto errato, poichè non è rilevante l'energia totale di un fenomeno bensì la sua velocità di liberazione e la sua concentrazione nello spazio. Basti pensare che sulla base dell'energia due etti e mezzo di pane sono equivalenti ad un chilo di tritolo.

Per il caso di ignizione dilazionata al massimo e che avvenga a 7 km dalla costa ed ipotizzando un cilindro infiammato di circa 2 km di diametro, la intensità di irraggiamento a terra sarebbe pari a $200/7^2= 4 \text{ kW/m}^2$, ancora inferiore a limiti di danno grave alle persone.

6. Protezione del personale del terminale

Come già detto, la nave-terminale ha una certa probabilità di non affondare, specialmente in considerazione del doppio scafo, di paratie verticali stagne abbastanza ravvicinate e di numerosi sistemi di protezione della nave contro l'incendio che dovrebbero continuare a funzionare per qualche tempo. La resistenza della nave a impatto aereo, se ipotizzato, dovrebbe comunque essere accuratamente verificata.

La protezione del personale, se la nave non affonda, richiederebbe la disponibilità di un locale bunkerizzato, come quelli usati, ad esempio, in impianti nucleari protetti, resistente ad un incendio di mezz'ora-un'ora dotato di tutte le manovre di impianto utili per azionamento antincendio, chiusura e apertura valvole eccetera, e di tutti gli opportuni dispositivi di emergenza opportuni (respiratori, ad esempio). Tutti i sistemi di emergenza e la nave nel suo complesso devono essere accuratamente verificati per la resistenza alle tre azioni dell'impatto aereo: forza localizzata, incendio, scuotimento.

7. Visibilità del terminale e della fiamma

La Figura 7 può servire a calcolare la distanza a cui è visibile un oggetto elevato.

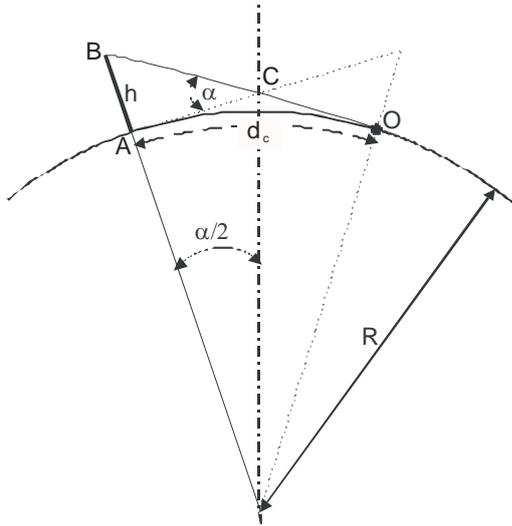


Figura 7. Visibilità di oggetti elevati tenuto conto della curvatura terrestre

Detto $R=6380$ km il raggio della Terra, le relazioni fra le grandezze in gioco sono

$$h = R \tan(\alpha/2) \tan(\alpha)$$

$$\alpha = d_c / R$$

Ove d_c è la distanza dell'oggetto lungo la circonferenza terrestre, h è l'altezza dell'oggetto AB ed O è la posizione dell'osservatore.

In particolare si ha che, a 22 km, l'oggetto più alto che non è ancora visibile è alto circa 38m.

La fiamma dell'incendio per ignizione immediata (assunto come usuale che la sua altezza sia il doppio del diametro), risulterebbe visibile fino a circa 150 km.

8. Conclusioni

Sono state raggiunte le seguenti conclusioni per il caso più probabile di ignizione immediata dopo il rilascio di GNL: -la potenza irradiata sulla costa è al di sotto del limite di sopportabilità senza danni anche reversibili alle persone; -il vento indotto dall'esteso incendio è prevedibilmente trascurabile (sempre sulla costa); -si può presumere che la nave-terminale, se correttamente realizzata con strutture compartimentate, possa continuare a galleggiare almeno per il tempo necessario al personale per mettersi in salvo in opportune strutture di rifugio che si suppongono appositamente previste nel progetto della nave; -il rifugio del personale dovrebbe essere fattibile data la durata prevista dell'incendio; -è necessario che le azioni di emergenza che il personale deve intraprendere in caso di urto aereo o di altro impatto considerato, siano accuratamente studiate e incorporate nelle procedure di emergenza del terminale. E' stato inoltre esaminato il caso improbabile di un urto aereo o fenomeno simile senza contemporaneo incendio. In questo ipotetico caso, le distanze a cui può arrivare una nube di miscela di gas combustibile ed aria a concentrazioni infiammabili, potrebbero essere notevolmente maggiori che nel caso sopra esaminato. Non si prevedono tuttavia danni importanti alle persone sulla costa anche in assenza di qualsiasi provvedimento di emergenza. Anche questo caso dovrebbe essere accuratamente studiato, per completezza, in sede di stesura di procedure di emergenza senza escludere la manovra di ignizione volontaria della nube gassosa per limitarne lo spostamento verso costa.

Bibliografia

[1] Gianni Petrangeli, Sicurezza Nucleare, ETS Pisa 2004

- [2] Gianni Petrangeli, Nuclear Safety, Elsevier, Oxford, 2006
- [3] Gianni Petrangeli, Large Airplane Crash on a Nuclear Plant, *Proceedings of ICAPP 2007, Nice France, May 13-18, 2007, Paper 7081*
- [4] Frank P. Lees, Loss prevention in process industries, Second edition, Elsevier, Oxford 1996
- [5] Mike Hightower et al., Guidance on Risk Analysis and Safety implications of a large liquefied natural gas (LNG) Spill over water, SANDIA REPORT, SAND 2004-6258, Dec 2004
- [6] Perry R.H., Chemical Engineering Handbook, Mc Graw Hill 1996
- [7] T.Hamre, H.A.Espedal, Operational Use of Wind Data for Slick Detection ,Nansen Environmental and Remote sensing Center, Norway, 2008
- [8] Brode H.L., Small D., A review of the Physics of Large Urban Fires, The Medical Implication of Nuclear War, Institute of Medicine, NAS, Washington D.C. 1986
- [9] Koseki Hiroshi and Yumoto Taro, Fire Technology, Vol 24.1 Feb. 88, Springer Netherlands