

RAFFREDDAMENTO DI SERBATOI IRRAGGIATI, CONTENENTI GAS LIQUEFATTI SOTTO PRESSIONE, MEDIANTE SCAMBIO TERMICO CON FLUSSO D'ACQUA

Marcello Mossa Verre - Cristiana La Marca - Francesco Marotta
ARPAT - Area per le Industrie a Rischio di Incidenti Rilevanti
Via N. Paganini, 66 - Firenze - Tel.: 055-3206353-3206375 - Fax: 055-3206324

SOMMARIO

La ricerca si inserisce nella problematica del raffreddamento di serbatoi irraggiati contenenti fluidi pericolosi con particolare riguardo ai gas compressi e liquefatti. Per essi lo scopo primario è, come è noto, quello di evitare il collasso del serbatoio e di contenere il surriscaldamento del fluido evitando il BLEVE del recipiente col conseguente fireball nel caso di fluidi infiammabili.

Lo studio, a carattere teorico, è necessariamente una schematizzazione della complessa realtà fisica: il modello studiato è quello di una lastra piana di larghezza indefinita e di lunghezza e spessore noti.

PREMESSA

Il raffreddamento dei serbatoi è usualmente ottenuto mediante l'impiego di appositi impianti ad acqua frazionata, ad erogatori aperti, opportunamente distribuiti in prossimità del mantello in modo da realizzare una lamina pressoché continua ed uniforme di acqua sulla superficie da proteggere esposta all'irraggiamento. Le portate specifiche d'acqua richieste sono essenzialmente funzione delle caratteristiche meccaniche del recipiente, del tipo di fluido contenuto, del grado di riempimento del serbatoio e del livello di sicurezza che si vuole raggiungere. I valori di portata fissati dalle normative dei principali Paesi (riferiti alla stessa struttura da proteggere) sono variabili da circa 1 ad oltre 10 l/min/m².

In tempi recenti il Legislatore italiano, per gli stoccaggi di GPL (DM 13.10.1994) ha apportato modifiche ai valori contenuti nella precedente normativa fissando la portata specifica in 10 l/min/m².

Ciò nonostante, la determinazione della portata d'acqua di raffreddamento è un problema ancora aperto e di particolare interesse, soprattutto in attività a rischio di incidenti rilevanti ove sono richieste valutazioni di congruità fra i rischi stimati e le misure di protezione adottate.

Nel presente lavoro viene studiato il caso di una lastra piana verticale, da un lato a contatto col fluido stoccato e dall'altro lambita dal film d'acqua di raffreddamento.

Il problema viene impostato nel caso generale e risolto numericamente con l'introduzione di opportune semplificazioni sempre cautelative.

IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA

Il problema della protezione da irraggiamento di serbatoi mediante l'impiego di impianti ad acqua può essere studiato in modo analitico e numerico risolvendo le equazioni di conduzione di calore in regime non stazionario imponendo ipotesi cautelative e semplificando la geometria del serbatoio.

La parete del serbatoio di geometria cilindrica o sferica può essere schematizzata come una lastra piana di spessore e lunghezza noti, date le grandi dimensioni del raggio rispetto allo spessore stesso. L'elemento piano così definito è bagnato completamente sul lato interno da un fluido fermo omogeneo (liquido o vapore), raffreddato esternamente da un film d'acqua e irraggiato, in condizioni stazionarie, con potenza per unità di superficie w (Fig. 1).

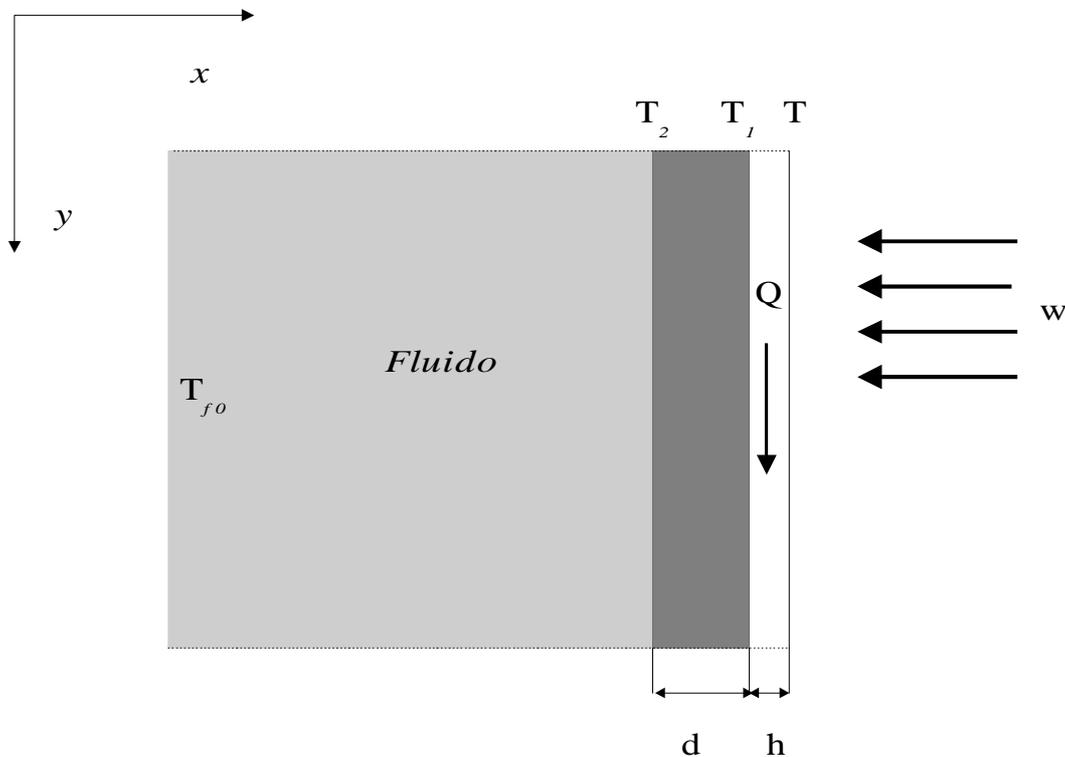


Fig. 1 Schema del sistema

Le equazioni di trasporto del calore su un elemento infinitesimo di volume $dx dy$ e larghezza unitaria del film liquido, della lastra e del fluido interno al serbatoio sono impostate assumendo che:

- la lastra abbia le caratteristiche di una pura resistenza (capacità termica nulla);
- l'acqua sia trasparente all'irraggiamento e la potenza irraggiata sia assorbita interamente dalla lastra;
- il film di acqua sia in regime di flusso laminare;
- il fluido interno sia in quiete;

- il tempo di interesse del fenomeno (durata dell'irraggiamento) sia inferiore al tempo caratteristico per il riscaldamento del fluido per cui è ragionevole assumere che la temperatura del fluido resti costante, cioè che il fluido, nella scala dei tempi studiata, abbia capacità termica infinita;
- la temperatura dell'acqua sia indipendente dalla coordinata x (Fig. 1) dato l'esiguo spessore del film;
- la trasmissione di calore per conduzione lungo l'asse y per la lastra e il fluido sia trascurabile rispetto a quella parallela al flusso irraggiato.

È di particolare interesse pratico il calcolo della portata di acqua necessaria affinché la temperatura del fluido nel punto più caldo (il punto più in basso a contatto con la parete) non raggiunga valori incompatibili con le caratteristiche del contenuto e del contenitore.

Le equazioni che descrivono il sistema sono i seguenti bilanci energetici:

Bilancio sul film di acqua:

$$\rho c_{pw} h \frac{dT}{dt} + Q c_{pw} \frac{dT}{dy} = -h K_w \frac{d^2 T}{dy^2} + \mathbf{a}_w (T_1 - T) - \mathbf{a}_e (T - T_e) \quad (1)$$

Bilancio sulla lastra:

$$\mathbf{a}_w (T_1 - T) + \frac{K_p}{d} (T_1 - T_2) = w \quad (2)$$

Bilancio sul fluido:

$$\frac{K_p}{d} (T_1 - T_2) = \mathbf{a}_f (T_2 - T_{f0}) \quad (3)$$

dove i simboli hanno i significati seguenti:

w	potenza irraggiata per unità di superficie della lastra;
Q	portata in massa d'acqua di raffreddamento per unità di larghezza;
h	spessore dello strato d'acqua;
α_w	coefficiente di convezione parete-acqua;
K_w	conducibilità termica dell'acqua;
c_{pw}	calore specifico isobaro dell'acqua;
ρ_w	densità dell'acqua;
T	temperatura media dello strato d'acqua;
α_e	coefficiente di convezione acqua-aria;
T_e	temperatura dell'aria;
T_1	temperatura esterna della parete.
d	spessore parete;
K_p	conducibilità termica della parete;
T_2	temperatura interna parete;
α_f	coefficiente di convezione parete-fluido interno;
T_{f0}	temperatura iniziale del fluido interno al serbatoio.

Per h vale la relazione (Landau L.,1971):

$$h = \left(\frac{3Qn_w}{r_w g \sin q} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

essendo:

v_w viscosità cinematica dell'acqua;
 g accelerazione di gravità;
 θ angolo d'inclinazione dell'elemento di lastra piana rispetto all'orizzontale.

Le condizioni al contorno da imporre alle (1-3) sono le seguenti:

$$T(0,t) = T_0 \quad , \quad (5)$$

$$T(x,0) = T^* \quad , \quad (6)$$

che corrispondono ad imporre che il flusso d'acqua giunga alla parete con temperatura T_0 (Eq. 5), e che all'istante 0 la temperatura media del film d'acqua sia T^* (Eq. 6). Sebbene una soluzione analitica delle (1-3) sia possibile (Galbiati P., 1996), una soluzione numerica del sistema permette di ottenere risultati più facilmente utilizzabili e eventualmente di affinare il modello, modificando le equazioni costitutive e le condizioni al contorno, senza vincoli derivanti dalla ricerca di soluzioni integrabili analiticamente.

In questo lavoro, risolviamo le (1-3) nelle ipotesi semplificative, significative per la maggior parte dei casi pratici, e sicuramente cautelative e cioè che i termini di scambio termico per conduzione nell'acqua e per convezione acqua-aria siano trascurabili rispetto al termine convettivo nell'acqua lungo l'asse y ;

Ritenendo cautelativo il caso in cui il fluido interno sia costituito interamente da vapore, nello sviluppo che segue si assume che lo scambio termico tra lastra e fluido interno sia trascurabile e quindi che $T_2=T_f$ (T_f = temperatura del fluido alla parete). Essendo nullo il trasporto di calore attraverso la lastra, la temperatura nella lastra è uniforme ($T_2=T_1$) e praticamente uguale a quella del film d'acqua, dato l'esiguo spessore del film stesso.

Con tali ipotesi il sistema si riduce alla semplice equazione:

$$rc_{pw} h \frac{dT}{dt} + Qc_{pw} \frac{dT}{dy} = w \quad (7)$$

con le condizioni al contorno (5) e (6). È importante sottolineare che per arrivare dalla (1-3) alla (7) il flusso di calore assorbito per convezione dall'acqua è stato considerato predominante rispetto a tutti gli altri contributi; è lecito quindi usare la (7) solo se tale ipotesi è verificata. In particolare, è chiaro che non si può assumere una portata d'acqua iniziale nulla, ma è necessario supporre che all'inizio dell'irraggiamento la parete sia già bagnata da un film d'acqua alla temperatura T^* della parete funzione della storia termica precedente del sistema.

Dalla risoluzione della (7) si ottengono i profili di temperatura dell'acqua (e di conseguenza del fluido interno al serbatoio) in funzione del tempo e della coordinata spaziale, al variare della portata di acqua alimentata e della potenza di irraggiamento.

Come esempio di applicazione è stato risolto il problema nel caso di temperatura iniziale del film di 60 °C e temperatura dell'acqua di raffreddamento di 15 °C, per diversi valori di potenza irradiata per unità di superficie (10-20 kW/m²) e di portata d'acqua (5-10 l/m²/min).

In Fig. 2 è riportata l'andamento della temperatura nel tempo per il punto y=L (dove L è la lunghezza della lastra). La temperatura cresce linearmente per effetto dell'irraggiamento fino a quando inizia a risentire della corrente di acqua di raffreddamento introdotta alla temperatura T₀ e si stabilizza ad una temperatura di regime. È interessante notare come la durata del transitorio, data la forte assunzione introdotta nel considerare nulle le capacità termiche del sistema, dipenda esclusivamente dalla portata d'acqua mentre la potenza irradiata influenza il riscaldamento del fluido nel transitorio e la temperatura allo stazionario.

In Fig. 3 sono riportati i profili di temperatura lungo la coordinata spaziale al variare del tempo per il caso Q=5 l/m² min e w=10 kW/m²: dopo il transitorio la temperatura cresce linearmente con y.

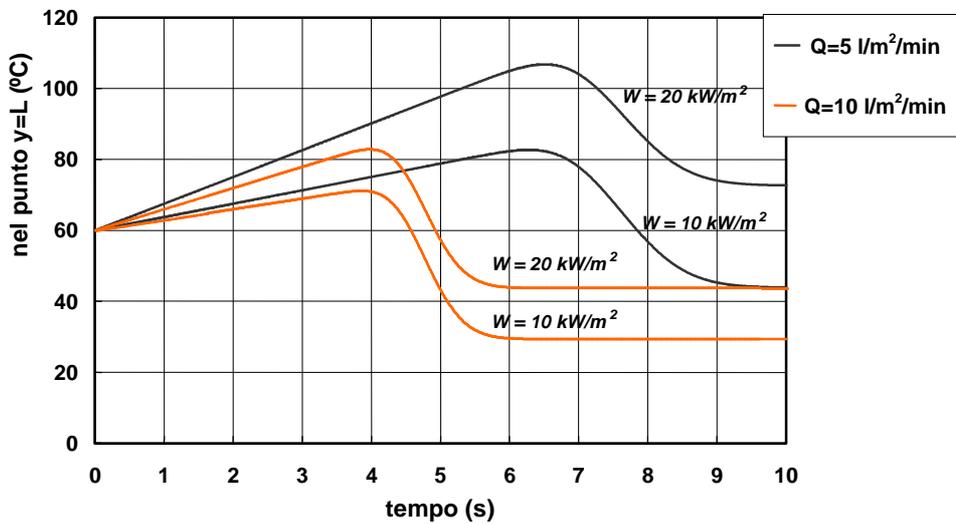


Fig. 2 Variazione della temperatura nel punto y=L

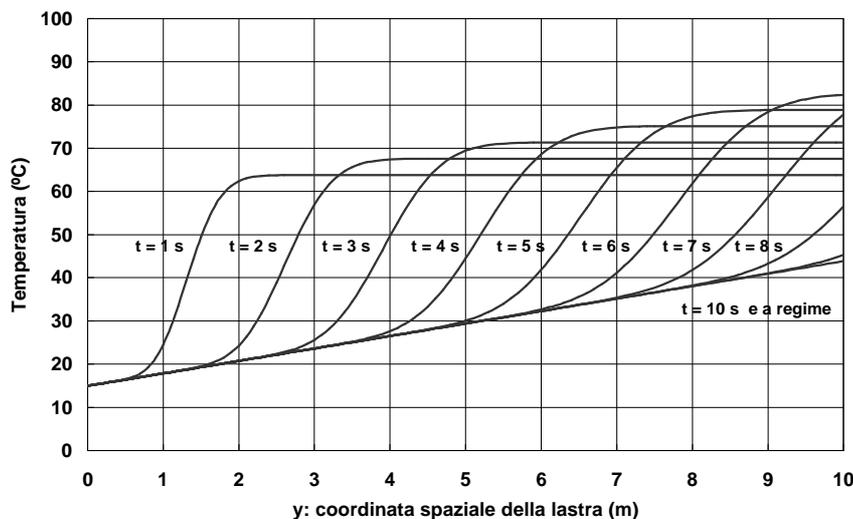


Fig. 3 Variazione del profilo di temperatura nel transitorio

Per le ipotesi introdotte il transitorio è di breve durata rispetto ai tempi significativi di intervento del sistema antincendio per cui, per lo scopo del presente lavoro, è ragionevole valutare la temperatura del film di acqua a transitorio esaurito, risolvendo quindi la seguente equazione:

$$Qc_{pw} \frac{dT}{dy} = w \quad (8)$$

che per $y=L$ diventa

$$T = T_o + \frac{w}{qc_{pw}} \quad (9)$$

dove q è la portata in massa specifica ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{min}$) dell'acqua di raffreddamento.

In Fig. 4 è riportato l'andamento della temperatura in funzione della portata in massa specifica per alcuni valori tipici della potenza incidente, con temperatura iniziale dell'acqua $T_o=15^\circ\text{C}$.

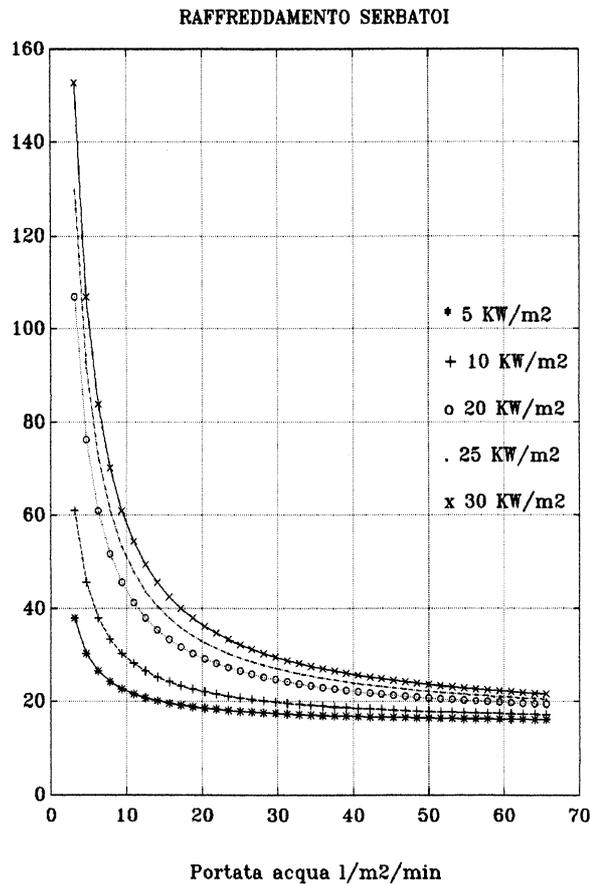


Fig. 4 Andamento della temperatura del film di acqua al variare della portata di acqua e della potenza di irraggiamento

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti forniscono una indicazione della portata di acqua necessaria a mantenere un serbatoio contenente un fluido pericoloso e soggetto a irraggiamento a temperatura inferiore a quella limite prefissata. Il fatto che la presenza di una portata d'acqua iniziale non nulla all'inizio dell'irraggiamento, con le ipotesi assunte, conduca ad un transitorio di breve durata, come conseguenza pratica porta a ritenere opportuno l'avviamento in automatico degli impianti in questione dai rivelatori di gas o, meglio, da sensori di temperatura superficiale dei serbatoi.

Un'analisi più accurata del problema può essere svolta tenendo conto di tutti i termini di dispersione termica trascurati in questa trattazione.

BIBLIOGRAFIA

- LANDAU, L., LIFCHITZ, E., "Mécanique des fluides", Cours de physique théorique, Éditions MIR, Moscou (1971).
- GALBIATI P., "Protezione da incendio di serbatoi tramite scambi termici con flussi d'acqua", 51° Congresso ATI – Udine, 1996

LISTA DEI SIMBOLI

c_{pw}	calore specifico isobaro dell'acqua
d	spessore parete
g	accelerazione di gravità
h	spessore dello strato d'acqua
K_p	conducibilità termica della parete
K_w	conducibilità termica dell'acqua
L	lunghezza della lastra
Q	portata in massa d'acqua di raffreddamento per unità di larghezza
T	temperatura media dello strato d'acqua
T^*	temperatura media del film d'acqua all'istante 0
T_1	temperatura esterna della parete
T_2	temperatura interna parete
T_e	temperatura dell'aria
T_{f0}	temperatura iniziale del fluido interno al serbatoio
w	potenza irraggiata per unità di superficie della lastra

Greci

α_e	coefficiente di convezione acqua-aria
α_f	coefficiente di convezione parete-fluido interno
α_w	coefficiente di convezione parete-acqua
ν_w	viscosità cinematica dell'acqua
ρ_w	densità dell'acqua
θ	angolo d'inclinazione dell'elemento di lastra piana rispetto all'orizzontale

Pedici

w	acqua
0	iniziale
f	fluido
p	parete