

I SISTEMI WATER MIST - VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DELLE EROGAZIONI DI TIPO DIRETTO E INDIRETTO SU INCENDI DI CLASSE B

Giovanni Manzini*

* Ph.D., Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, p.za Leonardo da Vinci, 32 20133 Milano

SOMMARIO

Al fine di stimare le prestazioni di alcuni sistemi water mist in scenari d'incendio di classe B comuni, quali sono quelli originati da pozze di liquidi infiammabili, sono stati effettuati dei test sperimentali con pool fire soggetti all'azione di diverse erogazioni dirette e indirette di questo tipo. Vengono presentati i principali risultati dei test eseguiti e, infine, vengono sintetizzate le risultanze di alcune simulazioni numeriche, finalizzate a riprodurre alcuni degli scenari d'incendio realizzati sperimentalmente, effettuate con l'ausilio del codice ECART.

GENERALITÀ

Nel settore della protezione attiva contro gli incendi la messa al bando degli agenti estinguenti alogeno-derivati, stabilita dal protocollo di Montreal, e l'accresciuta sensibilità alle problematiche ecologiche e della sicurezza hanno promosso lo sviluppo di nuovi sistemi dotati di un trascurabile impatto ambientale e di un'elevata efficacia.

Inoltre, un primo impulso allo sviluppo della tecnologia water mist venne dall'incidente aereo di Manchester (1984) che diede impulso ad uno sforzo internazionale per lo sviluppo di impianti antincendio ad elevata sicurezza da installare a bordo degli aerei passeggeri, che si concretizzò nel programma SAVE, supportato nel Regno Unito dall'Autorità dell'Aviazione Civile e negli USA dalla FAA (Federal Aviation Administration), che ebbe la collaborazione dei maggiori costruttori di aeroplani, quali la Boeing e l'Airbus. L'obiettivo del programma era di accrescere il tempo disponibile per l'esodo in sicurezza dei passeggeri da un aeroplano, in condizioni di emergenza incendio in seguito ad un in-cidente sulla pista di atterraggio. Altre forzanti, in questa direzione, provennero dalla IMO (International Maritime Organization), che promosse notevolmente l'installazione dei sistemi sprinkler sulle navi passeggeri, in seguito ad alcuni gravi incidenti avvenuti negli anni '80 a bordo dei traghetti della compagnia navale scandinava Scandinavian Seaways.

Per quanto riguarda il protocollo di Montreal, risalente al 1987, e avente lo scopo di limitare le emissioni delle sostanze responsabili della riduzione della fascia di ozono presente nella stratosfera, ha disposto il divieto d'uso di diverse sostanze tra le quali anche alcuni composti alogeno-derivati e, precisamente, gli halon 1211, 1301, 2402, che venivano impiegati spesso come agenti estinguenti. I sistemi che li utilizzavano venivano frequentemente e con successo utilizzati in scenari d'incendio ad elevato rischio e la loro eliminazione dal mercato ha creato la forte esigenza di sviluppare, in tempi brevi, nuovi agenti estinguenti e nuovi sistemi di erogazione caratterizzati da un'efficacia almeno equivalente ai precedenti, che andassero a sostituirli.

Questi sforzi si sono orientati sia verso nuovi agenti gassosi, che fossero in grado, al pari degli halon, di inibire chimicamente le reazioni di combustione, sia verso sistemi capaci di erogare in modo finemente nebulizzato l'agente estinguente più utilizzato, cioè l'acqua. Più precisamente quest'ultima tecnologia, denominata water mist permette di

generare un'erogazione costituita da gocce d'acqua di diametro medio solitamente pari a $30 \div 200 \mu\text{m}$ e dotate di elevate velocità di immissione nell'ambiente, con valori della portata generalmente prossimi ad una decina di litri al minuto. Questa iniezione d'acqua fortemente frazionata è ottenuta con dispositivi (erogatori) caratterizzati da una elevata pressione di funzionamento, che va abitualmente da poche decine fino a $50 \div 200$ bar, dotati di un numero elevato di fori di dimensioni estremamente ridotte, attraverso i quali l'acqua viene fatta fluire dopo avere attraversato dei piccoli condotti di forma opportuna. A questo proposito occorre sottolineare, inoltre, come la formazione del "mist" possa avvenire sia con sistemi che elaborano la sola acqua, denominati "single-fluid", sia con sistemi che miscelano l'acqua con agenti gassosi, come, ad esempio, l'azoto, denominati "twin-fluid". A tale riguardo si fa notare che i valori delle dimensioni medie delle gocce e delle portate utilizzate sono, generalmente, di uno o due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli dei sistemi convenzionali a pioggia, con erogatori di tipo sprinkler, e a diluvio.

La presenza, nell'ambiente dove ha sede l'incendio, di un numero elevato di gocce d'acqua di piccole dimensioni comporta una superficie totale esposta e valori dei coefficienti di scambio termico e massico notevolmente maggiori rispetto a quelli caratteristici delle erogazioni che sistemi convenzionali che generano gocce di diametro maggiore e, conseguentemente, una capacità di scambio di energia e di massa tra le gocce e l'ambiente circostante nettamente più elevata. Inoltre, essendo le gocce dotate di una massa estremamente ridotta, il "mist" erogato dispone della capacità di permanere per lungo tempo in sospensione e di raggiungere anche parti non direttamente esposte all'erogazione, grazie all'effetto di trascinarsi esercitato su di esso dai moti convettivi dei fluidi presenti, elevando ulteriormente la sua efficacia. Altro elemento di importanza non trascurabile, conseguente alla elevata dispersione in aria causata dalle masse ridotte delle gocce, e alla ridotta quantità d'acqua utilizzata, è lo scarsissimo effetto di bagnamento delle superfici. Per contro la riduzione della quantità di acqua che si deposita sui materiali implica una diminuzione dell'effetto di separazione tra combustibile e comburente e, per conseguenza, tende a diminuire la capacità estinguente, quando associata a questo fenomeno, rispetto alle erogazioni convenzionali, caratterizzate da un elevato bagnamento delle superfici. Ciò

comporta, però, la netta riduzione dei danni prodotti dagli shock termici nei materiali metallici e dalla penetrazione dell'acqua nei materiali porosi.

Si sottolinea, inoltre, che le ridotte quantità d'acqua utilizzate comportano, per questi sistemi, valori minori delle loro dimensioni e masse rispetto a quelli degli impianti convenzionali, nonostante le elevate pressioni di esercizio richiedano componenti di qualità più elevata ed, in particolare, più robusti e di spessore maggiore. Ciò crea una notevole riduzione degli ingombri e dei pesi e, conseguentemente, dei problemi installativi ad essi collegati.

Inoltre si sottolinea che sia le erogazioni water mist di tipo single fluid sia quelle di tipo twin fluid garantiscono una elevatissima compatibilità con la presenza dell'uomo, a differenza di quelle di diversi tipi di agenti estinguenti gassosi (es. CO₂).

Questo complesso di caratteristiche rende i sistemi water mist particolarmente indicati, come meglio spiegato nei successivi capitoli, per il controllo, la soppressione e l'estinzione di molti tipi di incendi. Tutto ciò, insieme al miglioramento della sensibilità alle tematiche inerenti la sicurezza antincendio che è recentemente avvenuto, ha favorito lo sviluppo e l'impiego della tecnologia water mist in molte applicazioni, che vanno da quelle del settore navale e marittimo, quali le sale macchina, i depositi e le cabine passeggeri, a quelle del settore terrestre, quali ancora le sale macchina, i CED, i teatri (La Scala e, a breve, il Petruzzelli), i musei, le linee metropolitane sotterranee (Londra, Madrid, Budapest) e anche alcune gallerie stradali (Virgolo - AutoBrennero e, a breve, A86 - Parigi, M30 - Madrid), fino a quello aerospaziale, dove la stessa NASA è interessata al suo impiego.

La crescita di questa tecnologia ha reso, ovviamente, necessario un processo di codificazione, che fino ad oggi è stato svolto, principalmente, dalla NFPA (National Fire Protection Association), che ha elaborato la norma NFPA 750 "Standard on Water Mist Fire Protection Systems", dalla IMO (International Maritime Organization), che ha elaborato molti protocolli di prova inerenti il settore navale e marittimo e dalla FM Approvals (Factory Mutual Approvals), che ha predisposto la norma FM 5560 "Approval Standard for Water Mist Systems". All'attività di questi enti di normazione si è affiancata quella di ricerca e sviluppo, svolta principalmente dal NIST (National Institute of Standards and Technology), dall'Università del Maryland, dal VTT (Technical Research Centre of Finland) e da alcuni costruttori quali Marioff Corporation Oy e Fogtec Brandschutz GmbH & Co.

LA PROTEZIONE ATTIVA CONTRO GLI INCENDI DI CLASSE "B"

Gli eventi combustivi incidentali sono spesso causati da perdite di idrocarburi liquidi che possono degenerare in incendi a causa di inneschi anche di energia minima. I sistemi di controllo, soppressione ed estinzione ad acqua non sono, generalmente, adatti all'impiego in questi casi, per la minore massa volumica presentata da tali liquidi rispetto all'acqua, che darebbe luogo a fenomeni di galleggiamento del combustibile con conseguente trascinamento e ampliamento della zona ricoperta dal combustibile che rilascia i vapori responsabili dell'incendio. I sistemi water mist [1], [2], essendo in grado di generare iniezioni di acqua finemente nebulizzata, producono un bagnamento molto ridotto delle superfici, e ciò, unito ad una elevata efficacia nella mitigazione della combustione, fa sì che siano impiegati con

successo in molti casi di incendi di questa tipologia, (classe B - UNI EN 2), in alternativa ai sistemi che impiegano gli agenti estinguenti gassosi, le schiume e le polveri [3], [4], [5].

Oltre a ciò, ricordiamo la scarsissima efficacia dei sistemi convenzionali ad acqua nei casi in cui non vengano impiegati per produrre erogazioni direttamente rivolte verso le superfici dei materiali, in modo da poter produrre un consistente bagnamento delle stesse, essenziale affinché possano espletare le loro azioni soppressive. In questi scenari, ove i focolai sono protetti dall'erogazione per mezzo di opportuni ostacoli, oppure sono distanziati dalla stessa in modo da trovarsi all'esterno del cosiddetto "cono di erogazione"¹, l'impiego dei sistemi water mist diviene anche maggiormente interessante, grazie alla rilevante dispersione del mist [6].

Negli studi da noi affrontati, la scelta del combustibile da adottare è caduta sull'eptano (C₇H₁₆) in quanto di caratteristiche simili a quelle di molti carburanti di larga diffusione e, inoltre, in grado di dare luogo facilmente a incendi difficilmente estinguibili, a causa, principalmente, della sua ridotta temperatura d'infiammabilità (-3 ÷ -4 °C) e del suo elevato potere calorifico (44,6 MJ/kg).

In particolare, sono stati effettuati test nei quali si sono impiegate erogazioni water mist dirette² su pool fire non esposti all'erogazione (scenari d'incendio abbastanza frequenti, quali sono quelli originati da pozze di liquidi infiammabili non esposte all'erogazione - nascosti) e altri nei quali sono state utilizzate erogazioni indirette, ossia del tipo "a cortina".

Il complesso dell'attività sperimentale è stato svolto in collaborazione con Marioff S.r.l., presso le facility situate all'interno della sede dell'azienda (stabilimento di Pero (MI)) e nel centro polifunzionale di addestramento dei VVF e della Protezione civile di Bovisio Masciago (MI)³.

Successivamente, sono state realizzate alcune simulazioni numeriche tese a riprodurre alcuni degli scenari d'incendio considerati, con l'ausilio del codice ECART⁴, in modo da saggiarne la validità e i limiti in questi casi.

EROGAZIONI DIRETTE

Al fine di verificare le prestazioni dei sistemi water mist in questi casi, sono stati effettuati dei test sperimentali in scenari simili a quelli di uno dei protocolli di prova contenuti all'interno della norma FM 5560⁵, che hanno previsto un pool fire di eptano soggetto all'azione di diverse erogazioni dirette di mist, protetto dall'erogazione da parte di una lamiera orizzontale soprastante. La diversificazione del tipo di erogazione, sempre di tipo twin-fluid⁶, è stata effettuata al fine di confermare la maggiore efficacia sui pool fire delle erogazioni di mist esplicitamente dedicate a questi tipi d'incendio [4].

L'attività sperimentale si è svolta all'interno di una camera

¹ In questo caso si parla di erogazioni indirette.

² Le erogazioni dirette sono quelle che comprendono nel "cono di erogazione" la fiamma e le superfici del combustibile coinvolte nell'incendio.

³ I sistemi utilizzati appartengono tutti alla famiglia Hi-Fog di proprietà della Marioff.

⁴ Enel Code for Release and Aerosol Transport, vs. 4W0E; programma di proprietà di CESI Ricerca, di tipo fast-running well-mixed, che utilizza i FVM (Finite Volume Methods). Il codice è, attualmente, ancora in fase di sviluppo da parte di un gruppo al quale appartengono gli scriventi.

⁵ Factory Mutual 5560: 2005 "Approval Standard for Water Mist Systems", sezione "Fire Tests for Water Mist Systems for the Protection of Special Hazard Machinery Spaces with Volumes up to, and Including, 9175 ft³ (260 m³)".

⁶ Le erogazioni sono composte da una miscela bifase di acqua liquida e azoto.

opportunamente allestita presso Marioff S.r.l, nella quale si sono realizzati i diversi incendi delle pozze d'eptano (Tabella 1). Il locale è dotato di diversi tipi di sistemi di erogazione water mist ad alta pressione e anche di un'apertura di ventilazione a soffitto per l'aspirazione dei fumi (non utilizzata in questi casi). Al suo interno sono state poi disposte le termocoppie per l'acquisizione dei valori di temperatura nelle zone prossime ai pool fire e i sensori per la misurazione della concentrazione di monossido di carbonio. Il locale prove consiste in una stanza di forma parallelepipedica che misura 6,5 x 4,0 x 4,0 m d'altezza, costituita da un'intelaiatura in acciaio, chiusa lateralmente da pannelli di vetro, e superiormente e inferiormente da pannelli metallici in lega d'alluminio. Il pavimento della camera è rialzato da terra di circa 1,0 m ed è realizzato con pannelli quadrati in metallo bugnato. L'accesso è consentito tramite una porta disposta sul lato più corto della stanza.

Inoltre, lungo l'asse principale della stanza ad una quota di 2,90 m rispetto al pavimento, sono installate due coppie di erogatori water mist, ciascuna delle quali collegata ad un diverso sistema.

I due sistemi in esame sono notevolmente distinti tra loro, poiché concepiti per essere impiegati su incendi di natura molto diversa. In particolare, il sistema DAU (Double-cylinder Accumulator Unit) è dedicato agli incendi che avvengono nei centri di elaborazione dati (CED), ovvero in quella tipologia d'ambienti in cui, per la presenza di componenti e dispositivi elettrici in tensione, l'acqua fino a qualche tempo fa era ritenuto un agente estinguente assolutamente inadatto. Invece, il sistema MAU (Machinery space Accumulator Unit) è stato progettato per l'impiego su incendi tipici delle sale macchina, che sono, nella maggioranza dei casi, causati dalla fuoriuscita di un liquido combustibile dai sistemi di contenimento (pool fire, spray fire). Si sottolinea che entrambi i sistemi dispongono di unità di alimentazione autonome, formate da bombole di acqua e da bombole di azoto in pressione, ed erogano acqua nebulizzata mista ad azoto⁷.

Test	Ventilazione	Erogazione water mist diretta
1	Porta socchiusa (20 cm apertura)	No
2	Porta socchiusa (20 cm apertura)	Si - DAU (Ritardo $\Delta t = 30$ s)
3	Porta socchiusa (20 cm apertura)	Si - MAU (Ritardo $\Delta t = 30$ s)

Tabella 1 - Test sperimentali effettuati.

Pool: 0,4 x 0,4 m, 0,75 l C₇H₁₆ (4,69 mm), 1,0 l H₂O (6,25 mm).

Sistema MAU: D_{v90} ≈ 200 μm, p_{iniziale} alimentazione = 200 bar

Sistema DAU: D_{v90} ≈ 50 μm, p_{iniziale} alimentazione = 200 bar

La presenza della lamiera soprastante il pool, ha fatto sì che la fiamma venisse raggiunta dal mist solamente a seguito della elevata dispersione di quest'ultimo all'interno del locale. Questo fenomeno, particolarmente accentuato dalle piccole dimensioni delle gocce, ha consentito a quantità rilevanti di acqua di raggiungere, comunque, la zona soprastante la pozza di eptano (Figura 1). Tutto ciò ha permesso la rapida

vaporizzazione di una quantità considerevole di mist, che ha prodotto, conseguentemente, il raffreddamento della miscela reagente e dello spazio immediatamente circostante (Figura 2, Tabella 2, Tabella 3), oltre che la riduzione del tenore di comburente e dei vapori di combustibile, nella stessa, mitigando così il processo combustivo.



A



B

Figura 1 - Immagini corrispondenti ad un istante di poco successivo all'attivazione dell'erogazione water mist: A - sistema MAU; B - sistema DAU.

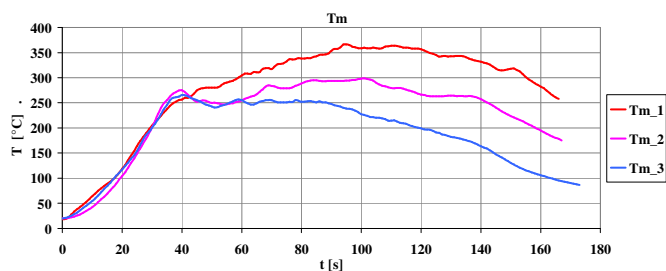


Figura 2 - Andamenti della temperatura media T_m rilevata nell'intorno della fiamma, per mezzo di termocoppie disposte esternamente alla stessa, nei test 1 (evoluzione libera), 2 (con erogazione DAU) e 3 (con erogazione MAU).

T_{media1} [°C]	278,2
T_{media2} [°C]	229,6
T_{media3} [°C]	191,2
$\Delta T_{media2-1}$ [°C]	-48,6
$\Delta T_{media2-1}$ %	-17,5
$\Delta T_{media3-1}$ [°C]	-87,0
$\Delta T_{media3-1}$ %	-31,3

Tabella 2 - Valori medi della temperatura T_m e differenze fra gli stessi, nell'intero intervallo corrispondente ai primi 160 s di transitorio, nei test 1, 2 e 3.

⁷ I due sistemi, avendo unità di alimentazione autonome dotate di bombole, erogano portate di acqua e azoto decrescenti nel tempo. A variare è, ovviamente, anche la distribuzione dimensionale delle gocce.

T_{Max1} [°C]	366,3
T_{Max2} [°C]	298,5
T_{Max3} [°C]	265,2
ΔT_{Max2-1} [°C]	-67,8
ΔT_{Max2-1} %	-18,5
ΔT_{Max3-1} [°C]	-101,1
ΔT_{Max3-1} %	-27,6

Tabella 3 - Valori massimi della temperatura T_m e differenze fra gli stessi, nell'intero intervallo corrispondente ai primi 160 s di transitorio, nei test 1, 2 e 3.

Gli incrementi attesi dei valori delle concentrazioni di CO, in particolare dei valori massimi (Figura 3, Tabella 4, Tabella 5), sono dovuti alla destratificazione (abbattimento) dei prodotti della combustione, provocata dal mist, e, presumibilmente, al lieve incremento della sua generazione, determinato dalla riduzione della concentrazione di comburente nella miscela reagente. Come osservabile, si tratta di valori, comunque estremamente bassi e compatibili con la salute dell'uomo.

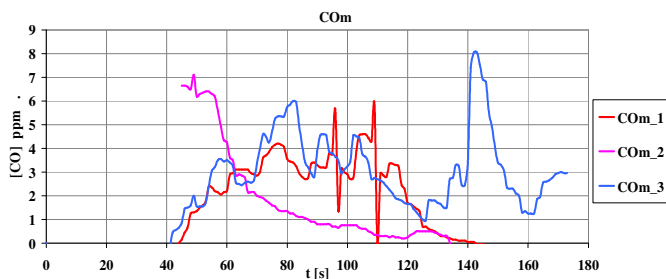


Figura 3 - Andamenti della concentrazione media CO_m rilevata all'uscita del locale, per mezzo di sensori disposti ad altezze pari a 1,75 e 2 m, nei test 1 (evoluzione libera), 2 (con erogazione DAU) e 3 (con erogazione MAU).

$[CO]_{media1}$ [°C]	1,3
$[CO]_{media2}$ [°C]	2,5
$[CO]_{media3}$ [°C]	2,0
$[CO]_{media2-1}$ [°C]	1,2
$[CO]_{media2-1}$ %	91,0
$[CO]_{media3-1}$ [°C]	0,7
$[CO]_{media3-1}$ %	54,0

Tabella 4 - Valori medi concentrazione CO_m e differenze fra gli stessi, nell'intero intervallo corrispondente ai primi 160 s di transitorio, nei test 1, 2 e 3.

$[CO]_{Max1}$ [°C]	5,9
$[CO]_{Max2}$ [°C]	7,1
$[CO]_{Max3}$ [°C]	8,1
$[CO]_{Max2-1}$ [°C]	1,3
$[CO]_{Max2-1}$ %	21,4
$[CO]_{Max3-1}$ [°C]	2,2
$[CO]_{Max3-1}$ %	37,6

Tabella 5 - Valori massimi della concentrazione CO_m e differenze fra gli stessi, nell'intero intervallo corrispondente ai primi 160 s di transitorio, nei test 1, 2 e 3.

Dai risultati ottenuti si è giunti ad una sostanziale conferma dell'efficacia del sistema MAU sugli incendi dei liquidi infiammabili. Infatti, si nota chiaramente dalla Figura 2, che la temperatura media, nel caso nel quale è stato impiegato il sistema MAU, assume valori nettamente inferiori rispetto a quelli relativi al caso nel quale è stato impiegato il sistema DAU e al caso di evoluzione libera del pool fire. A questo si

aggiunge l'osservazione relativa alla non trascurabile efficacia posseduta dall'erogazione del sistema di tipo DAU, attribuibile alle peculiari caratteristiche dell'iniezione ($D_{v90}=50 \mu m$, invece di $200 \mu m$ come per il sistema MAU e una maggiore portata massica di azoto, anche se a fronte di una portata d'acqua nettamente inferiore).

Per quanto riguarda la funzione svolta dalla lamiera di protezione, è palese la riduzione dell'efficacia dell'azione del mist sull'incendio, conseguente alla sua presenza. Effetto causato dall'ostacolo costituito dalla stessa alla circolazione del mist nell'ambiente, che riduce la quantità di gocce che raggiunge la fiamma. Anche se, come direttamente osservabile (Figura 1), il mist raggiunge, comunque, rapidamente e in quantità rilevante la zona di fiamma sottostante la protezione.

EROGAZIONI INDIRETTE

Questo gruppo di test è stato svolto presso il centro polifunzionale di addestramento dei VVF e della Protezione civile di Bovisio Masciago (MI), con l'obiettivo di valutare l'efficacia delle erogazioni indirette di tipo water mist (single-fluid) in scenari d'incendio di classe B. In particolare i test hanno avuto lo scopo di stimare l'influenza delle iniezioni di mist sulla combustione e sul mantenimento di condizioni di sicurezza per le persone e i beni materiali all'interno del locale impiegato nei diversi scenari d'incendio realizzati [4], [7].

L'attività sperimentale ha visto la presenza di ufficiali del Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco, tra i quali il direttore regionale per la Lombardia ing. D'Ambrosio, e di esperti appartenenti a società interessate all'impiego di questa innovativa tecnologia, tra le quali la società aeroportuale SEA.

Precisamente sono state realizzate diverse configurazioni di prova, caratterizzate dalla presenza di un pool fire di eptano in un ambiente confinato, di dimensioni pari a 6 x 10 x 2,5 m, realizzato con una opportuna struttura in lamiera metallica, all'interno della quale l'iniezione dell'acqua nebulizzata è stata prodotta da un'insieme di erogatori disposti a soffitto, sotto forma di una cortina con direzione principale verticale, in prossimità della mezzeria del locale (Figura 4).

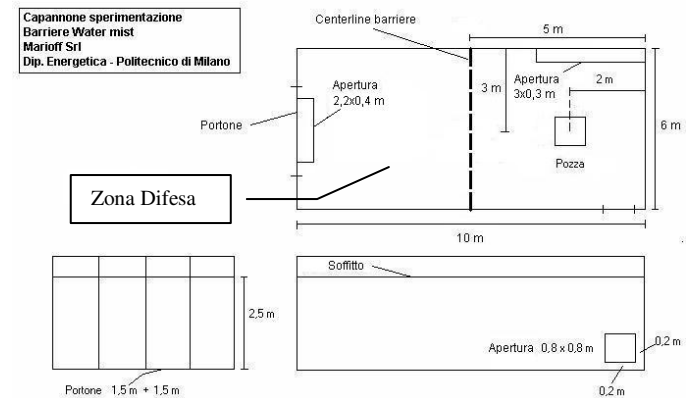


Figura 4 - Locale impiegato per i test relativi alle erogazioni indirette.

Sistema di erogazione water mist composto da n. 9 erogatori: costante caratteristica $K= 1,4 [l/(min \cdot bar^{1/2})]$; pressione di esercizio $p= 80$ bar; diametro volumetrico $D_{v90} \cong 200 \mu m^8$.

Come prima ricordato i test hanno avuto lo scopo di valutare l'influenza delle erogazioni water mist indirette sull'andamento della combustione del pool fire e sulla sicurezza dell'ambiente nei diversi scenari d'incendio realizzati; ciò è stato possibile attraverso la misura dei valori di alcune variabili di primaria importanza, quali la durata della combustione, la temperatura dei fumi e la concentrazione di monossido di carbonio, al variare delle dimensioni del pool fire, delle condizioni di ventilazione e, in un ultimo test, dell'aggiunta di una quantità addizionale di combustibile di classe A (Tabella 6). Si sottolinea, che le diverse erogazioni sperimentate non sono state indirizzate direttamente sui focolai e sono state sempre generate ad una distanza di poco inferiore a 3 m dagli stessi e con asse verticale, in modo da escludere gli effetti sugli incendi determinati da una erogazione diretta del mist sulla zona di combustione.

Test	Pool	Ventilazione	Erogazione indiretta water mist
1	3	Portone chiuso	No
2	3	Portone chiuso	Si (Ritardo $\Delta t= 15$ s)
3	3	Portone aperto	No
4	3	Portone aperto	Si (Ritardo $\Delta t= 15$ s)
5	2	Portone chiuso	No
6	2	Portone chiuso	Si (Ritardo $\Delta t= 15$ s)
7	2	Portone aperto	No
8	2	Portone aperto	Si (Ritardo $\Delta t= 15$ s)
9	2'	Portone chiuso	No
10	2'	Portone chiuso	Si (Ritardo $\Delta t= 4$ min 44 s)
11-12	3A	Portone aperto	Si (Ritardo $\Delta t= 10$ min 9 s)
13-14	3A	Portone aperto - chiuso - aperto Ritardo iniziale chiusura portone $\Delta t= 4$ min 36 s, Successiva apertura portone $\Delta t= 7$ min 16 s (dall'istante iniziale).	Si (Ritardo $\Delta t= 7$ min 21 s)
15-16	3A'	Portone aperto	Si (Ritardo $\Delta t= 15$ s)

Tabella 6: Test sperimentali effettuati.

Pool 2: 0,6 x 0,6 m, 18 l C_7H_{16} (5 cm), 12,6 l H_2O (3,5 cm);
 Pool 2': 0,6 x 0,6 m, 10,8 l C_7H_{16} (3 cm), 12,6 l H_2O (3,5 cm);
 Pool 3: 0,4 x 0,4 m, 8 l C_7H_{16} (5 cm), 5,6 l H_2O (3,5 cm);
 Pool 3A: 0,4 x 0,4 m, 2,5 l C_7H_{16} (1,563 cm), 0,5 l benzina autotrazione (0,3125 cm), 5,6 l H_2O (3,5 cm), 10 kg legno, 0,1 kg pvc;
 Pool 3A': 0,4 x 0,4 m, 2,5 l C_7H_{16} (1,563 cm), 0,5 l benzina autotrazione (0,3125 cm), 5,6 l H_2O (3,5 cm), 20 kg legno, 0,2 kg pvc.

Ciò ha consentito che i fenomeni combustivi risentissero della presenza del mist solamente a causa della elevata

dispersione di quest'ultimo all'interno del locale, la quale ha permesso alle gocce d'acqua di raggiungere, comunque ed in quantità rilevante, le fiamme soprastanti la pozza di eptano. La rapida vaporizzazione di una quantità considerevole di mist ha prodotto, conseguentemente, il raffreddamento della miscela reagente, oltre alla riduzione del tenore di comburente e di vapori di combustibile, rallentando così in modo ragguardevole il processo combustivo.

Una parte consistente del raffreddamento dell'ambiente è, poi, ovviamente causata dall'elevata efficienza degli scambi termici convettivi e radiativi tra le gocce e la miscela aeriforme circostante.

Altra conseguenza di rilievo sugli effetti dell'incendio, registrata nel corso delle prove, è stata la realizzazione di una sorta di "barriera" contro la propagazione dei prodotti della combustione e la trasmissione del calore, costituita dall'erogazione water mist [8], [9]. L'ostacolo alla propagazione dei fumi è dovuto principalmente al loro drastico abbattimento, provocato dalla bassa temperatura e dal trascinamento causato dall'elevata quantità di moto inizialmente posseduta dal mist, in sinergia con la notevole superficie di scambio delle gocce dell'iniezione, che causano complessivamente una riduzione dei fenomeni di trasporto avvertito (trasporto macroscopico) e, conseguentemente, del trasporto convettivo complessivo. Ai fenomeni precedenti vanno aggiunti la captazione delle particelle solide e gassose, eventualmente in combinazione con l'adsorbimento e l'attrazione elettrostatica, che, anche se ritenuti di incidenza inferiore rispetto ai precedenti, concorrono ulteriormente al rafforzamento della mitigazione alla propagazione della massa dei fumi. Esiste poi una consistente attenuazione dei fenomeni di scambio termico radiativo, causata dal noto effetto "schermante", originato dalla presenza di un numero elevato di piccolissime gocce di acqua in aria, che, attraverso la combinazione dei fenomeni di assorbimento, trasmissione, riflessione e diffusione, amplia gli angoli solidi caratteristici della potenza irraggiata a valle, riducendo il flusso termico per unità di superficie [8], [9].

La sinergia tra la riduzione della velocità della reazione di combustione, comprovata dai tempi decisamente più elevati di consumo del combustibile, che comporta la generazione di una minore potenza termica e un minore flusso di prodotti della reazione stessa, e l'ostacolo alla propagazione di massa e calore, costituito dall'erogazione water mist, ha prodotto ritardi sensibili della crescita delle temperature e delle concentrazioni dei prodotti nocivi nella zona difesa, posta oltre l'erogazione water mist, e anche una generale riduzione dei valori di temperatura che si sarebbero altrimenti raggiunti (Figura 5, Tabella 7, Tabella 8).

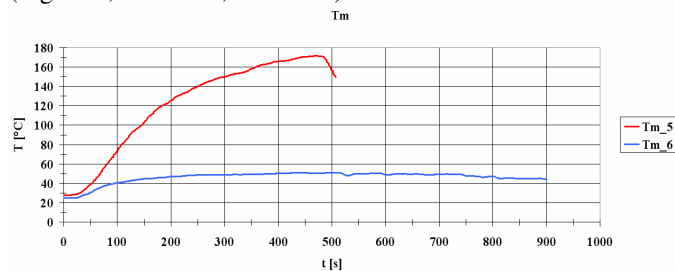


Figura 5 – Andamenti della temperatura media T_m rilevata nella "zona difesa", per mezzo di termocoppie disposte ad altezze da 1 a 2 m, nei test 5 (evoluzione libera) e 6 (con erogazione water mist). Tempi di combustione pari a: 507 s (test n. 5), 901 s (test n. 6).

⁸ Il sistema water mist utilizzato erogava solo acqua (single-fluid) e disponeva di un'unità di alimentazione dotata di elettropompa e, perciò, garantiva una erogazione di mist con caratteristiche stazionarie nel tempo.

T_{media5} [°C]	122,5
T_{media6} [°C]	44,8
ΔT_{media} [°C]	-77,7
ΔT_{media} %	-63,4

Tabella 7 - Valori medi della temperatura T_m nella “zona difesa” e differenze fra gli stessi, nell’intero intervallo corrispondente ai primi 507 s di transitorio, nei test 5 e 6.

T_{Max_m5} [°C]	171,5
T_{Max_m6} [°C]	51,2
ΔT_{Max_m} [°C]	-120,3
ΔT_{Max_m} %	-70,1

Tabella 8 - Valori massimi della temperatura T_m nella “zona difesa” e differenze fra gli stessi, nell’intero intervallo corrispondente ai primi 507 s di transitorio, nei test 5 e 6.

Gli incrementi attesi dei valori delle concentrazioni di CO, in particolare dei valori massimi (Figura 6, Tabella 9, Tabella 10), sono dovuti alla destratificazione (abbattimento) dei fumi sopra richiamata, che interviene contemporaneamente alla riduzione della quantità degli stessi che oltrepassa la barriera e, probabilmente, al lieve incremento della sua produzione, causata dalla riduzione locale del tenore di ossigeno nella zona di fiamma.

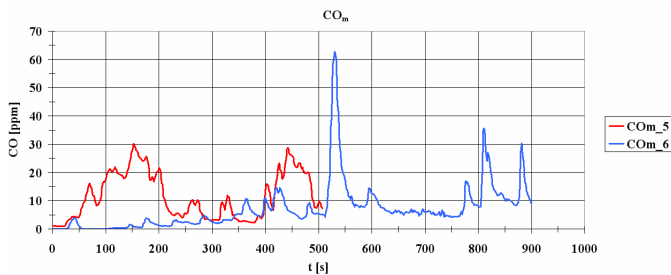


Figura 6 - Andamenti della concentrazione media di monossido di carbonio CO_m , rilevata nella “zona difesa”, per mezzo di sensori disposti ad una altezza pari a 2 m, nei test 5 (evoluzione libera) e 6 (con erogazione water mist).

Tempi di combustione pari a: 507 s (test n. 5), 901 s (test n. 6).

$[CO]_{media5}$ [ppm]	11,7
$[CO]_{media6}$ [ppm]	3,3
$\Delta [CO]_{media}$ [ppm]	-8,4
$\Delta [CO]_{media}$ %	-71,8

Tabella 9 - Valori medi della concentrazione CO_m nella “zona difesa” e differenze fra gli stessi, nell’intero intervallo corrispondente ai primi 507 s di transitorio, nei test 5 e 6.

$[CO]_{Max_m5}$ [ppm]	42,0
$[CO]_{Max_m6}$ [ppm]	280,0
$\Delta [CO]_{Max_m}$ [ppm]	238
$\Delta [CO]_{Max_m}$ %	566,7

Tabella 10 - Valori massimi della concentrazione CO_m nella “zona difesa” e differenze fra gli stessi, nell’intero intervallo corrispondente ai primi 507 s di transitorio, nei test 5 e 6 (valori rilevati per mezzo di uno strumento aggiuntivo, caratterizzato da tempi di risposta più brevi rispetto agli strumenti utilizzati per la rilevazione degli andamenti riportati nella Figura 6).

In conclusione i test hanno dimostrato che la presenza in un ambiente di un’erogazione water mist indiretta rallenta la combustione e il passaggio dei fumi e del calore, tendendo a realizzare, nel volume occupato dall’erogazione, un campo di temperatura ed uno stato di moto predefiniti ed incrementando, per conseguenza, la “solidità” ovvero la difesa dello stato della zona a valle, opposta a quella nella quale si

trova l’incendio, a favore della sicurezza delle persone e dei beni materiali. Nel corso dei test, infatti, i valori della temperatura e della concentrazione del monossido di carbonio, nella zona a valle del pool fire ed in presenza di erogazione water mist, sono sempre stati compatibili con l’esodo in sicurezza delle persone.

SIMULAZIONI NUMERICHE

Al termine, come già ricordato, è stata svolta un’attività di simulazione numerica condotta successivamente alla sperimentazione, con l’ausilio del codice ECART [10], allo scopo di saggiare le potenzialità e i limiti dell’attuale versione del codice (4W0E), all’interno della quale erano stati precedentemente implementati i moduli relativi alla modellazione dell’iniezione water mist [11] e dell’evoluzione dei pool fire [12]. Questa attività è stata svolta, attualmente, solo per riprodurre alcuni degli scenari d’incendio realizzati nell’ambito della sperimentazione relativa alle erogazioni indirette. In particolare sono qui riportati (Figura 7, Figura 8) alcuni dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche relative ai test n. 5 e n. 6, che evidenziano come il codice sia stato in grado di percepire l’influenza sulla combustione, oltre che sulle temperature dell’ambiente, dell’erogazione indiretta di mist nel locale di prova.

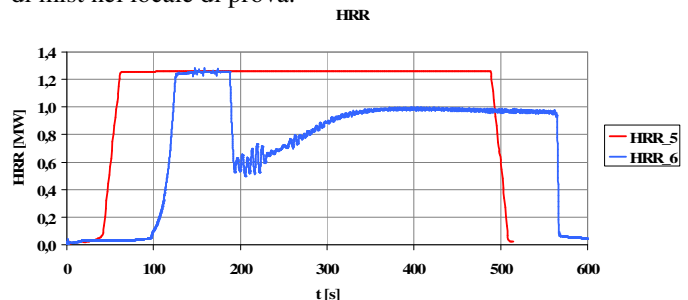


Figura 7 - Andamenti della potenza termica generata nelle simulazioni relative ai test 5 (evoluzione libera) e 6 (con erogazione indiretta water mist).

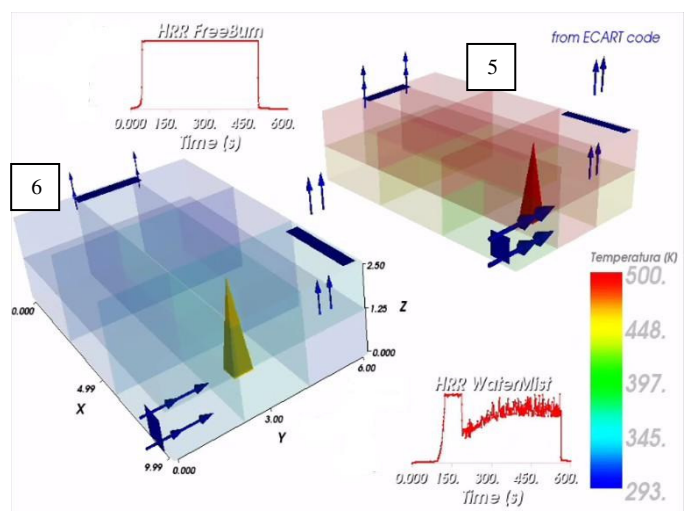


Figura 8 - Visualizzazione 3d della potenza generata dalla combustione (colore della fiamma) e della temperatura dei singoli volumi di controllo (colore dei 18 volumi di controllo interni al locale) nelle simulazioni relative ai test 5 (evoluzione libera) e 6 (con erogazione indiretta water mist).

È evidente dalle immagini (Figura 7, Figura 8) che il tempo di combustione relativo al test n. 6 è ancora eccessivamente ridotto rispetto al caso reale e, perciò, che l’influenza esercitata sulla combustione viene riprodotta dal codice in

modo ancora quantitativamente insufficiente. Ciò è dovuto, principalmente, al modulo combustivo del codice e alla discretizzazione spaziale ancora eccessivamente grossolana⁹.

CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle attività svolte è emersa con chiarezza la potenzialità di mitigazione degli incendi di classe B e dei loro effetti posseduta dai sistemi water mist ad alta pressione impiegati su pool fire non direttamente esposti all'erogazione dell'agente estinguente, anche se in casi solamente indicativi della complessa realtà di questi scenari.

Inoltre, è parsa di particolare importanza, oltre alla elevata efficienza degli scambi termici del mist, ragione primaria della sua efficacia nell'inibizione del processo di combustione, anche la rilevante dispersione dello stesso nell'ambiente, che gli permette di "invadere" in quantità notevole, oltre che rapidamente, le diverse zone dell'ambiente, comprese le zone di fiamma degli incendi suddetti.

Infine, a causa della rimarchevole incertezza che caratterizza ancora oggi l'impiego di questi sistemi, sembra che, nelle indagini interpretative e previsionali dell'azione del mezzo estinguente, si possa affiancare con successo alla sperimentazione, l'utilizzo dei codici di calcolo, in grado di integrarne e completarne i risultati.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano l'ing. F. Parozzi (CESI Ricerca), principale autore di ECART e l'ing. L. Iannantuoni (Dip. di Energia del Politecnico di Milano) per l'indispensabile supporto di assistenza fornito. Infine, si desidera ringraziare l'ing. L. Nigro (Marioff S.r.l.) per l'appoggio e la fiducia costantemente riposti nel ns. lavoro di ricerca.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] K. Notarianni, "Water mist fire suppression systems", Proc. of Tech. Symp. on Halon Alternatives, June 27-28, 1994, Knoxville, TN;
- [2] J. R. Mawhinney, Gerard G. Back, "Water Mist Fire Suppression Systems", Chapter 14, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, 2002;
- [3] P. Andreini, G. Manzini, P. Parolini, "La tecnologia water mist per il controllo e l'estinzione degli incendi", La Termotecnica, gennaio-febbraio 2005;

- [4] G. Manzini, "Valutazione dell'efficacia dei sistemi water mist nel controllo, nella soppressione e nell'estinzione degli incendi", Tesi di Dottorato in Energetica, Politecnico di Milano, 2007;
- [5] G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale, "Fire suppression by water sprays", Prog. in Energy and Combustion Science, 79-130, 2000;
- [6] Z. Liu, A. K. Kim, J. Z. Su, "Examination of performance of water mist fire suppression systems under ventilation conditions", Journal of Fire protection engineering, Vol. 11, august 2001;
- [7] G. Manzini, "Le barriere water mist per la protezione attiva contro gli incendi", La Termotecnica, dic, '05;
- [8] J. M. Buchlin, "Thermal shielding by water spray curtain", Journal of loss prevention in process industries 18, 423 – 432, 2005;
- [9] J. Malet, P. Corieri, J. M. Buchlin, "Mechanical and thermal actions of liquid curtains using hydroshield nozzles", Journal of Aerosol Science, Vol. 30, Suppl. 1, 535-536, 1999;
- [10] F. Parozzi e al., "ECART Code User's Manual", CESI Ricerca, 2005;
- [11] P. Andreini, G. Manzini, A. Morstabilini, "Valutazione dell'efficacia dell'erogazione water mist nel controllo, nella soppressione e nell'estinzione degli incendi: implementazione di modelli di simulazione numerica e confronto con risultati sperimentali", CESI Report A5055702, 2005;
- [12] G. Manzini, "Modello matematico interpretativo e previsionale della dinamica dei pool fire", CESI Report A5055692, 2005.

NOMENCLATURA

D_{v90} : diametro volumetrico al 90% - è la dimensione delle gocce al di sotto della quale si trova il 90% del volume d'acqua erogato;

MAU: Machinery space Accumulator Unit;

DAU: Double-cylinder Accumulator Unit.

SUMMARY

Analysis of water mist pool fire control and suppression (direct and indirect injection) by experimental and computational activity. Mitigation of fire effects (high temperatures and CO concentrations) inside confined spaces.

⁹ È, attualmente, in fase di sviluppo una versione del codice in grado di supplire anche a queste carenze.