

# **APPLICAZIONE DI METODOLOGIE PROGETTUALI DI TIPO “FIRE SAFETY ENGINEERING” PER LO STUDIO DI PROBLEMATICHE ANTINCENDIO INERENTI GLI STOCCAGGI DI MATERIE PRIME E PRODOTTI FINITI NELL’INDUSTRIA CARTARIA**

**Ponziani, F.A. 1, Tinaburri, A. 1**

**1 Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, Ministero dell’interno, Largo S. Barbara 2, Roma 00178, Italia**

## **SOMMARIO**

Il presente lavoro ha come obiettivo l’applicazione di specifiche metodologie proprie dell’Ingegneria del Fuoco, o Fire Safety Engineering (FSE), per lo studio di talune problematiche antincendio inerenti gli stoccaggi di materie prime e prodotti finiti nell’industria cartaria. Una volta individuati gli scenari di riferimento (combustione della cellulosa, utilizzata come materia prima; bobine di carta, prodotto intermedio della macchina continua; prodotto finito di tipo tissue (carta igienica o salviette)) e l’evento di interesse (dinamica dell’incendio in relazione anche alle modalità di stoccaggio), vengono scelti opportuni modelli FSE per le elaborazioni di analisi e per le conclusioni di sintesi relative al sistema esaminato, anche alla luce di apposite indagini sperimentali in scala ridotta condotte per confrontare possibili percorsi critici di propagazione dell’incendio. In particolare, tramite l’applicazione dei modelli FSE e con giudizio ingegneristico, è possibile esaminare specifiche criticità del sistema e adottare appositi accorgimenti per la prevenzione (ante evento) e per la protezione (post evento) relative all’insediamento. L’evoluzione dell’incendio viene indagata confrontando differenti disposizioni geometriche, che rappresentano i prototipi delle più comuni geometrie di stoccaggio. eseguendo alcune serie di incendi sperimentali tramite modelli fisici in scala ridotta. I modelli di incendio in scala ridotta hanno l’obiettivo di replicare il fenomeno e di consentire adatte visualizzazioni dei principali fenomeni presenti, quali ad esempio la combustione covante o la combustione con fiamma delle bobine di carta, la formazione di correnti gassose favorite oppure sfavorite dalla disposizione geometrica del materiale combustibile e dell’ambiente circostante. Sono inoltre presentati alcuni modelli, fra quelli consolidati e disponibili in letteratura internazionale, che consentono di schematizzare la dinamica in osservazione mediante l’analisi dimensionale.

## **1.0 INTRODUZIONE**

I prodotti cartari si possono suddividere in 6 grandi categorie: carta da stampa, carta da scrivere e per ufficio, carte da imballaggio, cartoni e cartoncini, articoli igienico-sanitari, carta per uso industriale e varie. In Italia questo comparto è costituito da una cinquantina di aziende, spesso integrate nel converting e da numerose piccole aziende cartotecniche trasformatrici. La produzione globale secondo stime recenti è di circa 1.200.000 tonnellate di cui circa il 35% viene consumato in Italia ed il resto esportato. Il segmento principale è rappresentato dalla linea casa (tissue) per la produzione di carta igienica (con circa il 60% del mercato), rotoli di carta da casa, da tovaglioli e fazzoletti. Per quanto attiene alla problematica della progettazione e del controllo della sicurezza antincendio la materia risulta difficile da gestire per la mancanza di normative di riferimento e per un approccio generalizzato qualitativo più che quantitativo ed ingegneristico del problema. La mancanza di una normativa di riferimento del settore che costituisca il riferimento certo ai fini della prevenzione incendi rende inoltre impossibile il ricorso alla procedure di autocertificazione previste nel regolamento di attuazione dello Sportello Unico per le Attività Produttive (D.P.R. n. 447/97 e s.m.i.). La recente emanazione del D.M. 9 maggio 2007, recante “Direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio”, ha fornito una prima apertura alla possibilità di applicare tali metodologie, in specie nel caso di insediamenti di tipo complesso o a tecnologia avanzata, ad edifici di particolare rilevanza architettonica e/o costruttiva e per l’individuazione delle misure di sicurezza equivalente nei casi di deroga. Tuttavia l’assenza di un sistema codificato e condiviso di regole e di linee guida per l’applicazione di tali tecniche, unito alla carente qualificazione di quanti operano nel settore, costituisce un punto di criticità notevole. Questo lavoro si pone quindi come un primo passo per rendere possibile l’applicazione di tali metodologie al particolare settore degli stoccaggi di carta di tipo tissue.

## 1.1 Stoccaggi di carta tissue

Nel processo di lavorazione, la carta tissue viene prodotta dalla macchina continua sotto forma di bobine (“jumbo rolls”) di notevoli dimensioni, successivamente destinate al converting, termine con il quale si indica la trasformazione delle bobine “madri” in prodotti intermedi e finali destinati ai vari mercati.

L'accatastamento delle bobine avviene di norma a pavimento e quasi mai è previsto l'impiego di strutture di contenimento ad eccezione di cordoli di tenuta al rotolamento laterale. L'immagazzinamento può avvenire in strati orizzontali o verticali: nel primo caso la movimentazione viene fatta con carroponte, nel secondo caso con muletti elevatori e per motivi di stabilità al ribaltamento ( e in subordine di altezza dei magazzini) in genere non si supera il limite di impilamento di due bobine madri (Figura 1).



Figura 1. Stoccaggi di carta e macchina continua

Il rischio maggiore nel locale magazzino è quello d'incendio del materiale depositato. A causa dei grandi quantitativi immagazzinati e dell'elevata intensità di stoccaggio, l'incendio di tale reparto può costituire un rischio per l'intera realtà produttiva (Figura 2).



Figura 2. Incendi di reparti di stoccaggi di carta

Le condizioni di stoccaggio delle bobine sono condizionanti per lo sviluppo di un eventuale incendio: lo stivaggio in verticale favorisce l'incendio per tiraggio naturale dei fumi dovuto attraverso le anse cilindriche delle bobine. A causa della relativamente elevata frequenza di incendio, gli stoccaggi hanno ricevuto nel tempo una considerevole attenzione. Alcune aziende multinazionali, in accordo con compagnie internazionali di assicurazione, hanno implementato standard di “progettazione” e gestione dei magazzini in cui vengono definiti gli aspetti legati all'estensione del magazzino, alle modalità di stivaggio, cubatura dei lotti, protezione antincendio (tipicamente con ricorso ad impianti sprinkler eventualmente coordinato con evacuatori di fumo e calore). E' da sottolineare il ruolo svolto dall'imballaggio (film in polietilene) nell'aumentare la velocità di propagazione dell'incendio. L'installazione di evacuatori di fumo e calore nei magazzini è legata per lo più a valutazioni economiche di costo/beneficio, anche considerata in generale l'ampia estensione delle superfici da proteggere, peraltro dotate di ampie superfici frangibili per l'illuminazione dei locali (vetrate e pannelli in policarbonato in copertura). E' da notare comunque che un'elevata percentuale di incendi di stoccaggi è di natura dolosa, legata a fasi di congiuntura economica negativa o per la distruzione di prodotti non a specifica.

## 2.0 OSSERVAZIONI BASATE SU ESPERIMENTI IN PICCOLA SCALA

La sperimentazione condotta è stata progettata per replicare, alla piccola scala di laboratorio, alcuni tratti caratteristici della termofluidodinamica e della combustione di cilindri verticali costituiti di tessuto celluloso. Il modello utilizzato nella sperimentazione di laboratorio è costituito da un rotolo di carta tissue di forma cilindrica cava, costituito da un corpo cilindrico formato da fogli avvolti e da una anima cava cilindrica centrale formata da cartone, avente le dimensioni di 9,5 cm in altezza, 10,4 cm di diametro esterno e 4,1 cm di diametro interno dell'anima ed un peso di circa 74 grammi.

Sono state investigate alcune configurazioni particolari, allo scopo di rilevare analogie e diversità: singolo cilindro verticale cavo con base appoggiata direttamente sul supporto incombustibile, singolo cilindro verticale cavo con base rialzata rispetto al supporto incombustibile, due cilindri verticali cavi affiancati orizzontalmente con base rialzata rispetto al supporto incombustibile, quattro cilindri verticali cavi affiancati orizzontalmente con base rialzata rispetto al supporto incombustibile, due cilindri verticali cavi sovrapposti con base rialzata rispetto al supporto incombustibile.

La strumentazione utilizzata è costituita da una bilancia elettronica (Sartorius), alcune termocoppie (tipo K) e da un acquisitore dati (Dataaker modello DT 500). Le prove sono state seguite nei laboratori della Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica e sono state riprese con una videocamera. Sono state registrate le temperature in alcuni punti significativi e la perdita in peso dei campioni durante la combustione. La modalità di innesco della combustione, identica per tutte le configurazioni, è stata scelta sia per garantire una adeguata velocità iniziale di propagazione della fiamma sia per replicare una possibile modalità di innesco al vero. Tale modalità di innesco è stata realizzata mediante il contatto prolungato di un fiammifero con il bordo esterno inferiore posto sulla parete esterna del rotolo. La comparazione delle sperimentazioni nelle varie configurazioni scelte ha permesso di rilevare, innanzitutto, le seguenti analogie di comportamento, principalmente legate alla natura cellulosa del materiale combustibile, alla configurazione geometrica di forma cilindrica verticale cava ed alla modalità di innesco prescelta:

- a) la prima propagazione in direzione verticale verso l'alto della combustione con fiamma lungo la parete esterna del cilindro sottoposto all'innesco sino al raggiungimento del bordo superiore del rotolo;
- b) la penetrazione orizzontale della combustione sotto forma di punti incandescenti e sotto forma covante verso l'anima cava interna del cilindro;
- c) la propagazione della combustione ai rotoli non innescati in corrispondenza delle superfici di contatto con i/il rotolo in fiamme.

Sono state poi rilevate le seguenti diversità di comportamento, principalmente legate alla modalità di afflusso di aria per la combustione, talune delle quali aventi valenza critica addirittura per lo sviluppo ed il mantenimento della combustione con fiamma:

- a) arresto della combustione in caso di mancanza di spazio libero sottostante la base del cilindro;
- b) propagazione verticale con fiamma lungo la parete esterna del cilindro verticale cavo ed effetto di tiraggio con propagazione verticale verso l'alto di fiamma dalla canna cilindrica verticale interna in caso di presenza di spazio libero per l'afflusso d'aria sottostante la base del cilindro.

Vengono di seguito riportate, per ciascuna configurazione investigata, le principali osservazioni rilevate.

Nella configurazione con singolo cilindro verticale cavo con base appoggiata direttamente sul supporto incombustibile, quindi senza alcuna possibilità di afflusso di aria dal basso al di sotto del cilindro, una volta rimosso l'innesco dal bordo inferiore della parete esterna si è osservata un'iniziale propagazione verticale verso l'alto della combustione sulla parete esterna che si è poi arrestata ed ha mantenuto carattere covante e quindi tendenza al raffreddamento fino al termine della prova.

Riconosciuto l'importante effetto di richiamo di aria dal basso, sono state allestite le successive configurazioni di prova utilizzando appositi supporti incombustibili posti al di sotto dei cilindri, in modo da consentire uno spazio libero di afflusso di aria tra la base del cilindro e lo spazio sottostante incombustibile. Tale intercapedine è peraltro presente negli stoccaggi reali di prodotti su pallets.

### 2.1 Singolo cilindro

Nella configurazione con singolo cilindro verticale cavo con base rialzata rispetto al supporto incombustibile, una volta rimosso l'innesco dal bordo inferiore della parete esterna, si è osservata un'iniziale propagazione verticale verso l'alto della combustione sulla parete esterna, seguita da una accelerazione della stessa propagazione con presenza di fiamma e fumo. Una volta giunta in prossimità del bordo superiore, la combustione si è propagata lateralmente dall'esterno verso l'interno lungo il diametro della faccia

orizzontale superiore del cilindro cavo. Contemporaneamente, è aumentata la superficie e la profondità della zona interessata dalla combustione, principalmente in forma di punti incandescenti e punti carbonizzati, lungo la parete esterna interessata dalla iniziale propagazione di fiamma. Nel contempo, mentre la propagazione con fiamma e fumo si stava manifestando sulla parete verticale esterna, l'afflusso di aria dal basso consentiva lo spostamento della combustione dal punto di innesco orizzontalmente verso l'interno lungo il diametro della faccia orizzontale inferiore del cilindro cavo. Una volta giunta alla base della parete verticale interna della cavità cilindrica, la combustione è proseguita risalendo verticalmente la parete interna della cavità del cilindro, formata anch'essa da materiale celluloso seppur diverso dal tessuto del corpo del cilindro, manifestandosi con fumo e fiamme e, soprattutto, evidenziando una continua accelerazione dovuta all'effetto "camino" ossia al tiraggio dell'anima cilindrica interna (Figura 3). La combinazione degli effetti di combustione e di tiraggio ha, poi, consentito di osservare un particolare fenomeno critico: il repentino passaggio da una combustione sostanzialmente localizzata, anche se in più punti, ad una combustione generale con rapido attacco di fiamma unita ad un parziale collasso del tessuto combusto. Successivamente, si è osservato l'instaurarsi di uno stadio di combustione generale con fiamma e fumo sul cilindro fino al rallentamento ed all'arresto della combustione con fiamma, sostituita da una combustione con punti incandescenti e punti carbonizzati fino al raffreddamento finale al termine della prova.



Figura 3. Configurazione con un rotolo

## 2.2 Due cilindri affiancati

Nella configurazione con due cilindri verticali cavi affiancati orizzontalmente con base rialzata rispetto al supporto incombustibile, sono stati di nuovo osservati i principali fenomeni di mantenimento e propagazione verticale di fiamma una volta tolto l'innesco, di aumento della superficie e della profondità della zona interessata dalla combustione, di effetto camino, di transizione da una combustione sostanzialmente localizzata ad una veemente combustione generale con fiamma. Sono stati altresì osservati nuovi fenomeni, dovuti soprattutto alla mutua interferenza tra i due cilindri cavi affiancati, quali:

- aumento della velocità di combustione complessiva, a seguito degli effetti di contatto di fiamma e di irraggiamento tra i due cilindri;
- effetto di fusione delle fiamme ed aumento di tiraggio sulle superfici orizzontali superiori affiancate;
- effetto di formazione di un foglio frammentato di fiamma verticale sulle superfici orizzontali superiori affiancate.

Questi tre fenomeni sembrano degni di menzione particolare, in quanto dovuti all'accoppiamento in combustione dei due cilindri verticali cavi affiancati orizzontalmente.

Per quanto riguarda l'aumento della velocità di combustione complessiva, si è osservato che all'aumentare del flusso termico trasferito dal primo cilindro, nel quale si è innescata la combustione, al secondo cilindro posto a fianco in diretto contatto, non solo si sono formate zone inizialmente localizzate di combustione sul secondo cilindro ma si è anche osservato che tali zone rapidamente si sono trasformate in zone di combustione estesa e, di conseguenza, si è manifestato un effetto di retroazione termica dal secondo verso il primo cilindro sede della combustione originariamente innescata. Successivamente, la combustione si è generalizzata su entrambi i cilindri manifestandosi con fiamme e fumo.

A questa fase della combustione, in particolare, è possibile legare gli altri due fenomeni osservati nelle due prove di sperimentazione condotte in questa configurazione: la fusione delle fiamme ed il foglio di fiamma.

Per quanto riguarda la fusione delle fiamme ed il foglio di fiamma, nella prima prova condotta si è osservato come le fiamme, inizialmente presenti distintamente sui due cilindri affiancati, si sono unite sulla superficie delle facce orizzontali superiori dei due cilindri cavi assumendo, ad un particolare tempo, la particolarità di formare un unico fronte continuo di fiamma ad elevato tiraggio con simmetria centrale ed asse verticale, centrato sul punto di contatto tra le due facce orizzontali superiori. Nella seconda prova condotta, anziché un unico fronte continuo di fiamma si è formato, ad un altro particolare tempo, un insieme di fiammelle affiancate che hanno assunto successivamente la forma di un foglio oscillante.

### 2.3 Quattro cilindri affiancati

Nella configurazione con quattro cilindri verticali cavi affiancati orizzontalmente con base rialzata rispetto al supporto incombustibile, sono stati sostanzialmente osservati fenomeni simili a quelli osservati nella configurazione precedentemente descritta (Figura 4), con le principali differenze dovute all'assenza della fusione delle fiamme e alla presenza di un rapido deterioramento per combustione del materiale costituente i cilindri. A questo deterioramento è legato il successivo collasso di stabilità dei cilindri che ha comportato al termine anticipato di una delle due prove effettuate.



Figura 4. Configurazione con quattro rotoli

### 2.4 Due cilindri sovrapposti

Anche in questa configurazione, una volta tolto l'innesco, si è osservata la propagazione di fiamma verso l'alto sulla parete esterna del cilindro inferiore e l'aumento della superficie e della profondità della zona interessata dalla combustione sulla stessa parete esterna. Tuttavia, giunta in prossimità del punto di contatto tra i due cilindri sovrapposti, ossia giunta in sommità del primo cilindro, la fiamma non ha avuto più modo di manifestarsi e si è osservato un rapido arresto del fronte di fiamma ed il mantenimento di una zona di combustione covante. Si è allora provveduto a fornire un secondo innesco alla base del cilindro inferiore, dopodiché si sono osservati la ripresa della propagazione di fiamma verso l'alto sulla parete esterna del cilindro inferiore, il passaggio della combustione all'anima interna tramite la faccia orizzontale inferiore del cilindro inferiore stesso, la propagazione della fiamma sulla parete esterna verso l'alto anche sul cilindro superiore, la propagazione della fiamma e l'elevato effetto di tiraggio verso l'alto attraverso l'anima interna sia del cilindro inferiore che del cilindro superiore, l'aumento dell'altezza di fiamma. Infine, a causa del decadimento delle proprietà del materiale combusto, si è manifestata instabilità globale dei due cilindri sovrapposti il che ha comportato il termine della prova.

## 2.5 Dati sperimentali in piccola scala

I grafici delle temperature registrate nel corso della prova sono presentati in Figura 5, per le configurazioni a 2 e 4 cilindri affiancati in orizzontale. Tre termocoppie sono installate in corrispondenza dell'asse del cilindro innescato (con riferimento al bordo superiore del cilindro e posto  $L$ =altezza del cilindro: al centro dell'anima, a quota  $-\frac{1}{2}L$ ; a quota  $+\frac{1}{2}L$ ; a quota  $+L$ ). Nella configurazione con due cilindri, la quarta termocoppia è stata posizionata sull'asse del secondo cilindro mentre nell'altro caso è stata posizionata in corrispondenza del centro di simmetria dei quattro rotoli (in ambo i casi a quota  $+\frac{1}{2}L$ ).

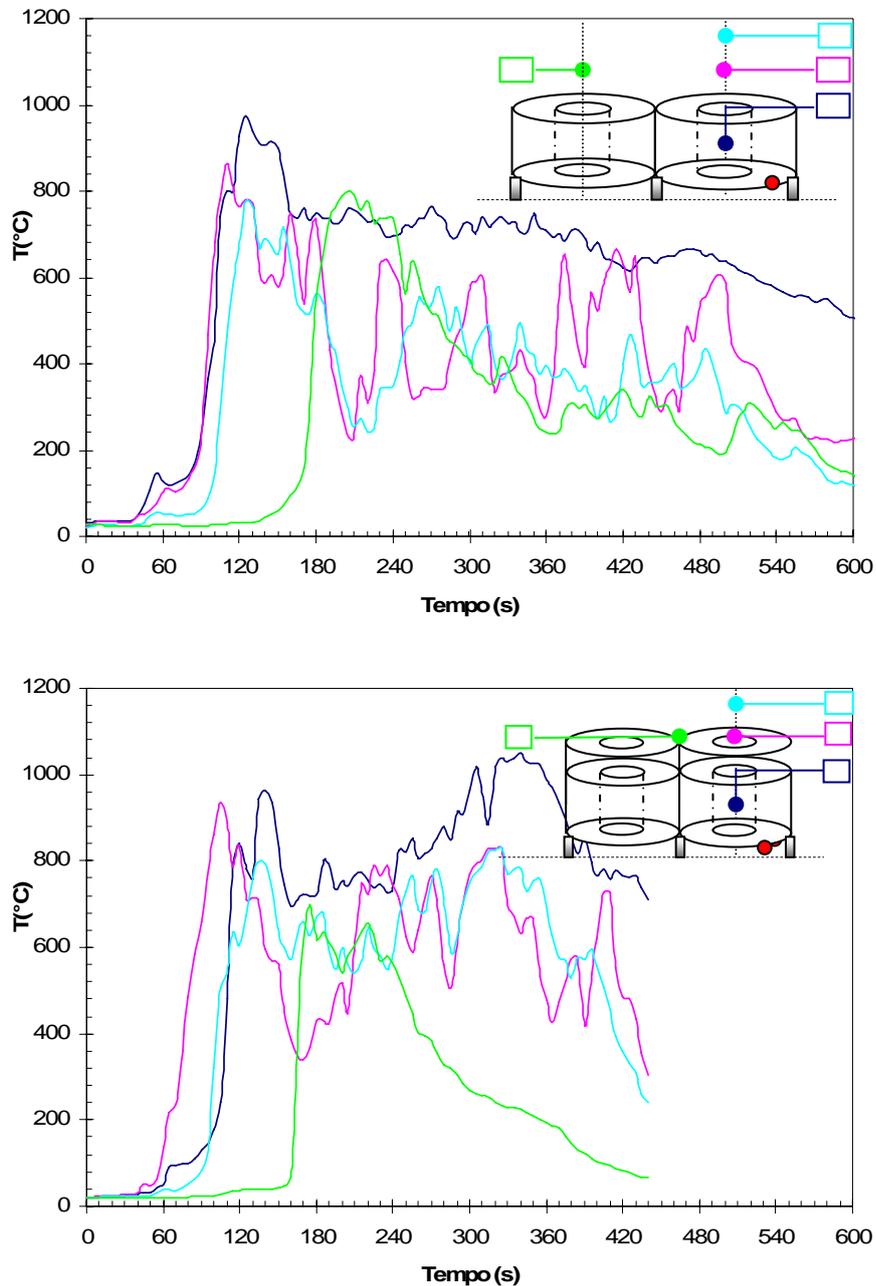


Figura 5. Profili delle temperature registrate nelle prove in scala ridotta nelle configurazioni con 2 e 4 cilindri

E' da notare che in entrambi i casi le termocoppie e le osservazioni delle riprese video forniscono, per il particolare materiale esaminato e per la configurazione testata, una velocità di propagazione della fiamma in direzione orizzontale (e quindi da un cilindro a quello adiacente) di circa 8 cm/s (in condizioni di "free burning" e quindi di assenza di effetti di retroazione tipici della combustione in ambiente confinato).

In Figura 6 sono riportati i dati relativi alla perdita in peso ottenuti per tutte le configurazioni testate (due serie di dati per ciascun set). Per facilitare il confronto è stato rappresentato il dato relativo alla perdita in peso diviso per il numero di cilindri utilizzati nella prova. Nelle prime tre configurazioni, in cui sostanzialmente si ha il raddoppio dei numeri di rotoli testati (1,2,4) è da notare che dopo una fase iniziale di lenta accelerazione, la perdita in peso in ciascuna prova si stabilizza sostanzialmente in una fase quasi stazionaria la cui altezza/ampiezza è inversamente proporzionale al numero di cilindri testati. Un tale comportamento è indice della presenza di fenomeni di interazione di tipo non lineare, comportanti un'accelerazione relativa della velocità di combustione. Diverso è invece il caso dei due cilindri sovrapposti, in cui nella fase iniziale, il fronte di fiamma impiega un tempo all'incirca doppio, proporzionale al raddoppio dell'altezza complessiva, per raggiungere la sommità verticale e poi iniziare a propagarsi lateralmente.

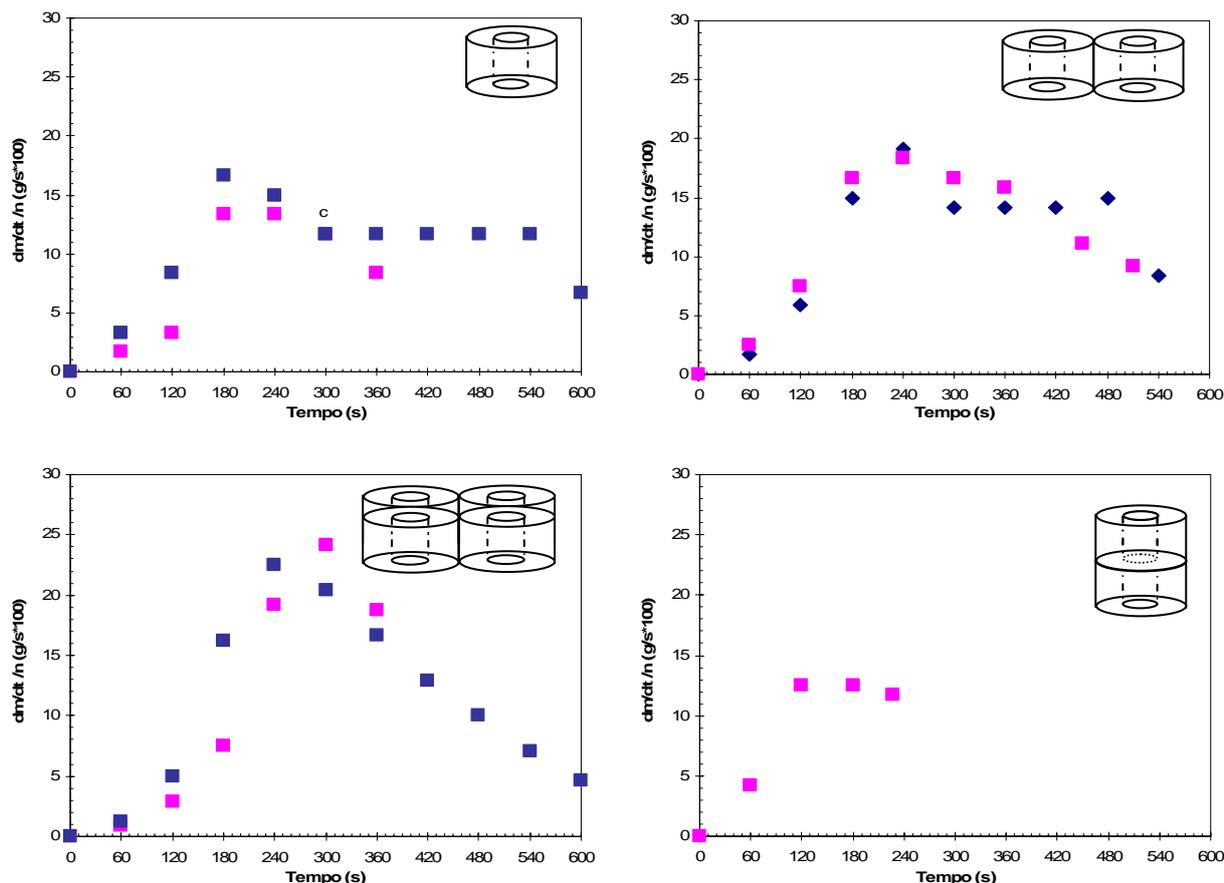


Figura 6. Perdite in peso registrate nelle prove in scala ridotta

Le osservazioni inerenti la modalità di propagazione della fiamma ottenute con l'esecuzione di prove di laboratorio in scala ridotta ed i dati presentati, consentono di ipotizzare una sequenza ("flow chart") della fase di sviluppo dell'incendio, utile per avere una visione globale del particolare comportamento al fuoco osservato, esemplificata in Figura 7.

Sulla base della sequenza degli eventi registrati nelle riprese, è possibile poi preparare uno sketch (ad es. vedi Figura 8): ciò è di grande aiuto per sintetizzare in modo semplice ed immediato le caratteristiche dell'incendio.

Lo scenario così ottenuto è utilizzabile come punto di partenza per fondare il modello fuoco per simulazioni numeriche dell'incendio in magazzini di stoccaggio di materiale tissue, in cui possono essere considerate le interazioni fra la sorgente ed i confini del dominio che descrive la geometria effettiva del compartimento, il rilascio di calore in condizioni di flashover e di incendio controllato dalla ventilazione.

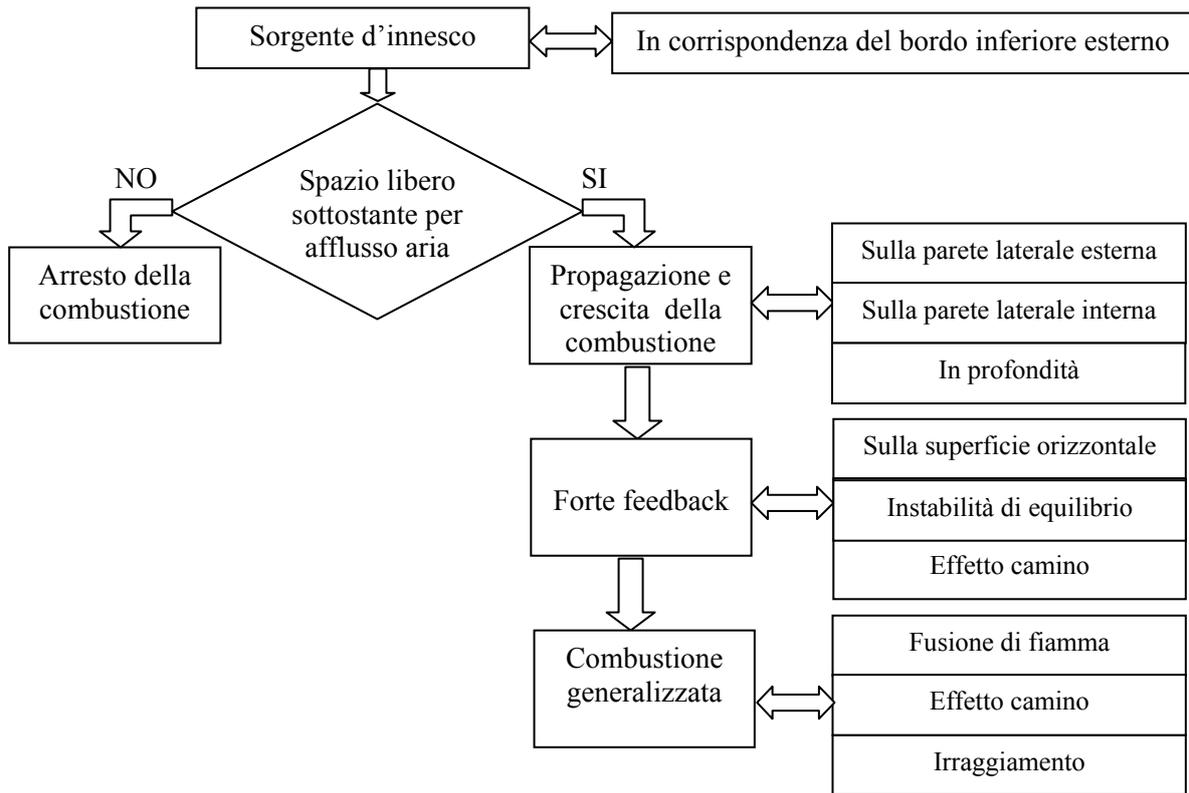


Figura 7. Schema di flusso delle fasi di sviluppo e propagazione dell'incendio di cilindri di carta.

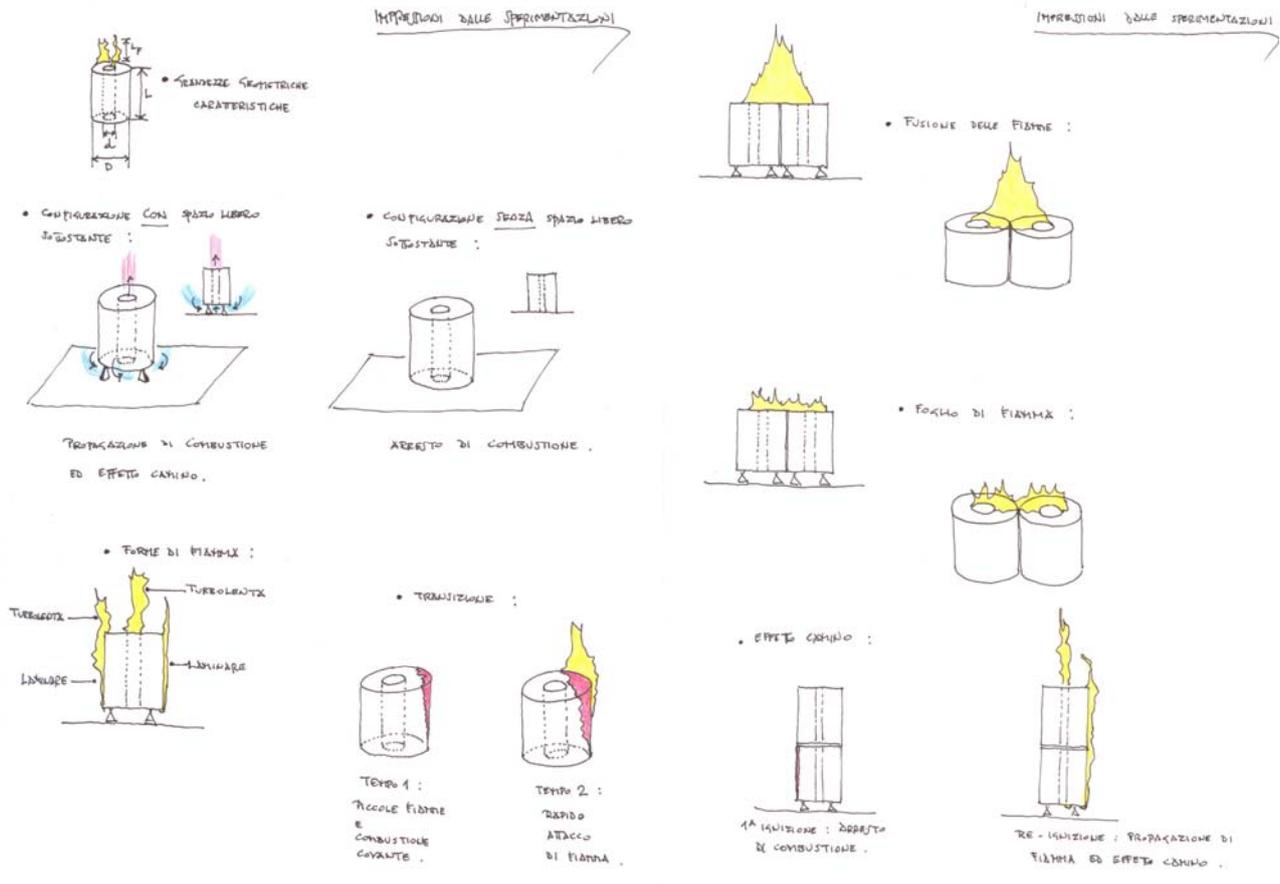


Figura 8. Sketch della dinamica dell'incendio nelle prove in scala ridotta

### 3. MODELLI ADIMENSIONALI FENOMOLOGICI PER L'ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

La sperimentazione condotta ha consentito di osservare importanti fenomeni inerenti la termofluidodinamica e la combustione di cilindri verticali cavi di materiale cellulosico di tipo tissue. I dati raccolti, oltre a descrivere importanti aspetti della fenomenologia investigata, possono essere utilizzati per cercare di definire una tendenza generale di comportamento relativa alle configurazioni studiate che è possibile utilizzare per fondare i modelli della sorgente dell'incendio nei modelli numerici della dinamica dell'incendio utilizzati nella Ingegneria del Fuoco ad esempio per la progettazione della sicurezza antincendio di stoccaggi di materiali aventi proprietà analoghe a quelle esaminate. Con l'aiuto di opportune equazioni fenomenologiche descrittive, adattate in forma adimensionalizzata, e della teoria dei modelli è possibile individuare appositi gruppi adimensionali applicabili alla specifica configurazione in esame, con i quali è possibile tener conto degli effetti osservati sperimentalmente, quali ad esempio il tasso di perdita in massa, la propagazione verticale di fiamma, il tiraggio aerodinamico, la configurazione geometrica. Opportune combinazioni di informazioni sperimentalmente rilevate (quali la perdita in massa del materiale, altezza di fiamma, altezza del cilindro, diametri esterno ed interno del cilindro, natura e tipo del materiale combustibile, temperatura dell'aria ambiente, temperatura di fiamme e fumo), di dati termofluidodinamici (densità, viscosità, temperatura, capacità termica delle correnti aeriformi innescate calde e fredde) e di dati geometrici (lunghezze ed aree caratteristiche) possono essere utilmente impiegate per individuare le correlazioni adatte per descrivere i fenomeni osservati. Tra i gruppi adimensionali più adatti per descrivere la fenomenologia osservata possiamo annoverare il numero perdita in massa adimensionale ed il numero di Grashof, entrambi riferiti ad una apposita lunghezza caratteristica quale, per la geometria esaminata nel presente studio, l'altezza del cilindro. Effetti di curvatura possono anche essere all'occorrenza inclusi, tenendo conto dei rapporti tra l'altezza ed il diametro interno e tra l'altezza ed il diametro esterno del cilindro verticale cavo.

Ulteriori dati inerenti il rilascio di potenza termica (ad es. il calore di combustione effettivo) possono consentire di utilizzare altri gruppi adimensionali tipici dell'Ingegneria del Fuoco, quali il numero di Zukoski, alla luce delle pertinenti lunghezze caratteristiche relative alle configurazioni studiate (principalmente altezza del cilindro e rapporto altezza su diametro).

Ciò premesso, per il caso in esame, è conveniente organizzare i dati raccolti utilizzando i seguenti gruppi adimensionali: la perdita in massa adimensionale ( $M$ ) quale parametro associato alla combustione ed il numero di Grashof ( $Gr$ ) quale parametro associato al flusso. I dati sperimentali (ottenibili da es. in prove in piccola scala) possono essere correlati in modo da esprimere il rapporto funzionale  $Gr$  versus  $M$ .

Le espressioni più convenienti da utilizzare per il calcolo dei numeri  $M$  e  $Gr$ , almeno in prima approssimazione e per lo studio effettuato, sono riportate rispettivamente in (1) e (2). In tali relazioni si fa riferimento al diametro interno ed all'area laterale della cavità interna e alle proprietà di pellicola o di film (denotate con il pedice  $f$ ). La lunghezza caratteristica  $L$  della configurazione è rappresentata dall'altezza del cilindro verticale.

$$M = \left( \frac{\Delta m}{A \Delta t} \right) \frac{L}{\mu_f}, \quad (1)$$

$$Gr \equiv Gr_L = g \frac{(T_{hot} - T_{\infty}) L^3}{T_f \nu^2} \quad (2)$$

in cui  $A = \pi d L$  – area della superficie di riferimento = area laterale della cavità cilindrica interna,  $m^2$ ;  $d$  – diametro interno dell'anima del cilindro,  $m$ ;  $L$  – lunghezza caratteristica = altezza del cilindro verticale,  $m$ ;  $\Delta m/A \Delta t$  – perdita in massa per unità di tempo per unità di superficie,  $kg \ m^{-2} \ s^{-1}$ ;  $T_{hot}$  – temperatura dello strato di aria calda all'interno della cavità cilindrica in prossimità della parete,  $K$ ;  $T_{\infty}$  – temperatura dell'aria ambiente,  $K$ ;  $T_f = (T_{hot} + T_{\infty})/2$  – temperatura di pellicola o temperatura di film,  $K$ ;  $g$  – accelerazione di gravità,  $9,81 \ m \ s^{-2}$ ;  $\mu_f$  – viscosità dinamica dell'aria a  $T_f$ ,  $kg \ m^{-1} \ s^{-1}$ ;  $\nu_f$  – viscosità cinematica dell'aria a  $T_f$ ,  $m^2 \ s^{-1}$ .

## **5.0 CONCLUSIONI**

L'utilizzo di un modello numerico dell'incendio è uno strumento credibile, se propriamente utilizzato e supportato da evidenze sperimentali in scala reale, per aiutare gli esperti nella ricostruzione della dinamica di un incendio o nella verifica/definizione delle misure di sicurezza antincendio in fase di progettazione. Le caratteristiche essenziali richieste nella definizione dei dati di input dei programmi di calcolo (in particolare il modello della sorgente che definisce l'incendio di riferimento) possono essere fondate con l'aiuto di un congruo numero di prove di laboratorio in piccola scala e con misure in scala reale. Solo se supportate da tali evidenze sperimentali, le predizioni di un modello numerico applicato alla modellazione della dinamica dell'incendio possono fornire un aiuto credibile per gli esperti sia nel settore della progettazione che in quello dell'investigazione delle cause dell'incendio.

### **Ringraziamenti**

Si ringrazia il C.S.E. Valter Ricci per il prezioso contributo alla redazione di questo lavoro, per il costante incoraggiamento, per la disponibilità ed il prezioso contributo di esperienza e competenza professionale: senza di essi questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Un riconoscimento speciale va al Ministero dell'Interno, Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica che ha ospitato le prove e fornito la strumentazione utilizzata.

### **RIFERIMENTI**

- [1] Kays, W. M. and M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, 1993, Mc Graw Hill, New York.
- [2] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2003, John Wiley and Sons, New York.
- [3] Welty, J. R., Wicks, C. E. and Wilson, R. E. and Rorrer G., Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, 2001, John Wiley and Sons, New York.
- [4] Holman, J. P., Heat Transfer, 1999, Mc Graw Hill, New York.
- [5] AA. VV., The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2002, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- [6] Quintiere, J.G., Fundamentals of Fire Phenomena, 2006, John Wiley and Sons, New York.
- [7] Zalosh, R.G., Industrial Fire Protection Engineering, 2003, John Wiley and Sons, New York.