

ASPETTI SPERIMENTALI E MODELLIZZAZIONE PER LA RICOSTRUZIONE DELLA DINAMICA DELL'INCENDIO IN CARROZZE FERROVIARIE

Tinaburri, A. 1, Ponziani, F.A. 1, Vestrucci, F. 2

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

2 Comando Provinciale dei Vigili del fuoco di Pistoia, Via Luigi Russo, 77, Pistoia 51100, Italia

SOMMARIO

La normativa tecnica del settore ferroviario fa grande affidamento sulle caratteristiche e sulla qualità dei materiali che è consentito impiegare per realizzare le finiture interni e gli arredi nelle carrozze ferroviarie. La selezione dei materiali, ai fini della valutazione del comportamento al fuoco, è basata in Italia sulla norma UNI CEI 11170-3. Il criterio standard per la classificazione delle performance di ciascun materiale varia in relazione all'impiego previsto del prodotto (ad es. per pareti, soffitto, pavimenti) ed è basato sulla combinazione dei risultati ottenuti sia nelle prove di "reazione al fuoco" che nei test di "tossicità". La memoria descrive le potenzialità ed i limiti dell'utilizzo dei dati sperimentali ottenuti con le prove condotte sui materiali utilizzati per realizzare gli interni delle carrozze ferroviarie nel definire i dati di input per i modelli di simulazione della dinamica dell'incendio. Tali modelli necessitano infatti per la loro implementazione delle informazioni disponibili circa la geometria della carrozza, delle proprietà termofisiche dei materiali e della sorgente. Le caratteristiche essenziali richieste nella definizione dei dati di input del programma possono essere desunte con l'aiuto di un limitato numero di prove di laboratorio in piccola scala e con misure in scala reale necessarie per conferire maggiore credibilità alle predizioni del modello numerico. L'analisi è focalizzata in particolare sui sedili, che rappresentano di gran lunga la principale sorgente di materiale combustibile. I risultati di tali studi possono essere utilizzati sia nella progettazione della sicurezza antincendio delle carrozze ferroviarie che nella ricostruzione della dinamica di eventi incidentali ai fini dell'investigazione delle cause.

1.0 PROVE SUI MATERIALI

1.1 La normativa italiana per il comportamento al fuoco dei materiali usati nel settore ferroviario

La normativa italiana relativa al settore ferroviario fa grande affidamento sulle caratteristiche e sulla qualità dei materiali che è consentito impiegare per realizzare le finiture interne e gli arredi nelle carrozze ferroviarie. La selezione dei materiali è basata sulla norma UNI CEI 11170 [1] parte 3 "Veicoli ferrotranviari. Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferrotranviari ed a via guidata. Valutazione del comportamento al fuoco dei materiali - Limiti di accettabilità". La norma richiede l'esecuzione di due tipi di prove relative alla valutazione della "reazione al fuoco" e della "tossicità" (basata sul potenziale di emissione di fumo e sull'analisi chimica di alcuni prodotti della combustione). Il criterio standard per la classificazione delle performance di ciascun materiale varia in relazione all'impiego previsto del prodotto (ad es. per pareti, soffitto, pavimenti) ed è basato sulla combinazione dei risultati ottenuti sia nelle prove di "reazione al fuoco" che nei test di "tossicità".

Per la "tossicità", la normativa italiana fa riferimento alla norma francese NF F 16-101 per la determinazione della classe di fumo. La definizione della classe viene ottenuta mediante il calcolo del valore dell'indice di fumo (IF), per i singoli materiali costituenti il prodotto esaminato. A tale indice concorrono i valori di densità ottica specifica (D_s), opacità dei fumi nei primi 4 minuti (D_{4min}) e l'indice di tossicità convenzionale (ITC), secondo la norma NFX 70-100, che assume nell'ambito del calcolo dell'IF un ruolo di primo piano.

I parametri che definiscono l'opacità dei fumi vengono ottenuti mediante l'esecuzione della prova descritta nella norma NF X 10-702 che utilizza come attrezzatura di prova la camera NBS in cui un provino di dimensioni 75×75 mm e di spessore massimo 25 mm viene posizionato verticalmente di fronte ad una sorgente radiante. Un gruppo ottico con raggio verticale consente di misurare la percentuale di trasmissione luminosa ($Tr\%$) che attraversa la camera e quindi, mediante una formula, la densità ottica specifica.

Per la valutazione della "reazione al fuoco" è richiesta l'esposizione di campioni di modeste dimensioni all'attacco termico di una piccola fiamma (di specificata altezza) o di un pannello radiante (con un dato livello di flusso radiante), per uno specifico intervallo di tempo. La fonte di ignizione viene quindi allontanata dal provino e l'operatore deve osservare se il campione continua a propagare la fiamma o

presenta fenomeni di gocciolamento di materiale fuso. Una velocità di propagazione della fiamma (misurata in mm/min) viene calcolata sulla base del tempo richiesto per raggiungere determinati traguardi.

E' importante notare che la norma UNI CEI 11170-3 richiede anche l'esecuzione di misure con il "cono calorimetrico", secondo la norma ISO 5660-1, al fine di valutare la velocità di rilascio del calore ("heat release rate") dei materiali provati.

1.2 La normativa europea per il comportamento al fuoco dei materiali usati nel settore ferroviario

A livello europeo, l'emanazione della direttiva 96/48/CE relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità e la conseguente necessità di armonizzare anche le valutazioni del comportamento al fuoco dei materiali impiegati nello specifico settore ha comportato la necessità di definire in ambito CEN gli standard di riferimento, tenuto conto delle indicazioni di riferimento stabilite a livello internazionale nella Fiche UIC OR 564-2. L'iter si è avviato con il programma di ricerca FIRESTARR, sponsorizzato dalla Commissione europea, che ha indicato i limiti dei metodi utilizzati nelle normative nazionali, in particolare per la valutazione della tossicità e suggerito gli orientamenti lungo i quali procedere per stabilire le nuove norme europee [2]. Fra le criticità evidenziate nell'utilizzo del metodo NFX 70-100, la ricerca ha sottolineato quelle legate alla rappresentatività dei provini (le dimensioni del campione, di un grammo, sono tali da fornire dati poco significativi e comunque senza alcuna correlazione con i dati ottenuti in scala reale), all'esecuzione delle prove sui singoli materiali componenti e non sul prodotto assemblato nelle condizioni d'uso, e ad un modello fuoco non sufficientemente aderente alla realtà per quanto concerne la ventilazione. Per superare tali limitazioni, nella normativa europea in fase di sviluppo (prCEN/TS 45545 [3]) le prove su citate per la valutazione della tossicità vengono sostituite dalla prova ISO 5659-2 con analisi in continuo dei fumi con tecnica FTIR, in cui viene utilizzata una camera NBS modificata nella quale vengono analizzati in continuo fumi ed effluenti di combustione. Nella configurazione proposta, è previsto che il campione sia disposto in posizione orizzontale e sia soggetto ad un calore radiante generato da una sorgente conica al quale si unisce l'azione di una piccola fiamma pilota. Un gruppo ottico consente di misurare in continuo il valore di densità ottica dei fumi (D_s) ed una sonda FTIR di analizzare in continuo mediante un sistema spettrofotometrico le concentrazioni dei singoli gas contenuti negli effluenti di combustione. L'andamento delle concentrazioni dei singoli gas nel tempo permette il calcolo del CIT (Conventional Index of Toxicity) inteso come somma dei rapporti fra le concentrazioni di ogni singolo gas all'istante t e il rispettivo valore limite che provoca incapacitazione, che si ritiene intervenire al tempo necessario per il raggiungimento del valore $CIT=1$. Per ogni materiale o componente costituente il prodotto e per ogni composizione di più materiali utilizzati nella sua realizzazione, i valori di D_s , VO4F (opacità dei fumi media su quattro minuti) e di tempo per il raggiungimento di $CIT=1$ vengono confrontati ai valori limite fissati dalla prEN45545-2 in funzione dei vari livelli di rischio (4 livelli definiti nella prEN45545-1).

Per quanto concerne in maniera specifica le poltrone, la prova viene effettuata su una poltrona completa e risulta essere particolarmente significativa poiché consente di misurare il rilascio di calore nel tempo del manufatto. La sorgente di innesco è rappresentata da un bruciatore che simula l'innesco provocato da un cuscino di carta avente un peso di 100 grammi. Il bruciatore viene applicato per un periodo di tempo di tre minuti prima di essere rimosso. La poltrona è posizionata su una bilancia in modo da poter avere la perdita di peso istante per istante durante tutto il tempo di prova. Il tutto viene posizionato sotto la cappa di aspirazione fumi del Room Corner Test (ISO 9705) nel cui condotto sono presenti le sonde di misura del tenore di ossigeno residuo e quindi di calcolare il rilascio di calore HRR in funzione del tempo. La prova deve essere effettuata sia sul sedile non vandalizzato che sul sedile vandalizzato ed il progetto di norma fornisce i valori limite per i vari livelli di rischio di un parametro denominato MARHE (Maximum Average Rate of Heat Emission) significativo ai fini del rilascio di calore. E' inoltre prevista una prova in scala reale effettuata su una ricostruzione di compartimento nel quale sono stati riprodotti i volumi e le condizioni di ventilazione tipici della realtà. I differenti modelli di poltrone possono essere provati sia in condizione di nessuna vandalizzazione che vandalizzati.

2.0 MODELLI DI CARROZZE FERROVIARIE

Numerose sono le tipologie di carrozze ferroviarie utilizzate per il trasporto passeggeri nel territorio nazionale. La tipologia esaminata nel presente lavoro è quella del tipo Medie Distanze Vestiboli Centrali (MDVC), costruita secondo un progetto sviluppato nel corso degli anni '80 ed usualmente impiegata in convogli costituenti treni intercity per percorrenze fino a 400 km. E' composta da tre compartimenti divisi da

due ampi vestiboli con porte di entrata laterali. Le caratteristiche principali della carrozza e degli impianti tecnologici sono riportate in Tabella 1 ed in Figura 1.

Tabella 1. Dati tecnici relative alla carrozza ed agli impianti tecnologici

Lunghezza	26.55 m
Altezza interna	~ 2.40 m
Larghezza interna	2.70 m
Capacità	82 posti (22 posti nel 1° compartimento, 38 posti nel 2° compartimento, 22 posti nel 3° compartimento)
Entrate per l'accesso dei passeggeri	Due, in cristallo stratificato Chiusura automatica
Porte di servizio interne	Quattro Autochiusura, con comando di ritorno a molla
Illuminazione	Lampade fluorescenti Spegnimento automatico temporizzato all'arresto del treno
Riscaldamento	Ad aria forzata

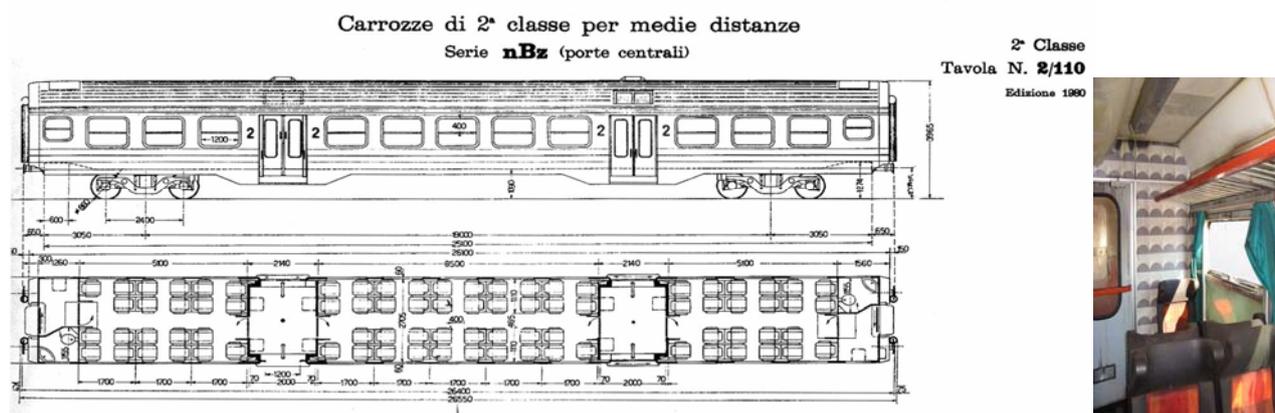


Figura 1. Prospetto e disposizione interna dei posti di una carrozza MDVC

Il corridoio è posizionato al centro della carrozza ed i sedili sono disposti in file organizzate in gruppi di quattro con disposizione vis-a-vis. Ciascun sedile, munito di poggiatesta ed origliere, è realizzato con l'impiego di poliuretano schiumato pellato "autoestinguente", di colore nero, con struttura tubolare in acciaio, coperto con una sezione centrale di tessuto a base di fibre di nylon. Gli interni mostrano un notevole utilizzo di laminati plastici, sia decorativi che strutturali. Il rivestimento del soffitto è rivettato al sistema di climatizzazione.

3.0 VERIFICHE PROGETTUALI MEDIANTE PROVE SU SCALA REALE

Nella UNI CEI 11170-3 (e come è peraltro richiesto nel CEN TS 45545-2), per i veicoli di nuova costruzione o di completa ristrutturazione, è richiesto il superamento della prova di "incendio su scala reale" secondo la metodologia e con i limiti richiesti dalla Fiche UIC OR 564-2 e definiti nel prospetto 3 dello standard. Nel caso di veicoli a "salone" deve essere sottoposta alla prova una zona dello stesso compresa tra due sedili a correre (se previsti), altrimenti, tra due sedili contrapposti. In quest'ultimo caso la costituzione dell'angolo va realizzata con la parete di fondo del salone. La sorgente di innesco è posizionata sul sedile prossimo alla parete longitudinale (lato finestrino), il cui rivestimento può essere preventivamente vandalizzato. Le condizioni di ventilazione della camera di prova devono essere quelle previste per l'ambiente nelle reali condizioni di esercizio (condizioni di ventilazione controllata).

Lo scopo di tali normative è quello di fornire i dati necessari per valutare il comportamento durante l'incendio dei materiali in condizioni che riproducano, per quanto possibile, quelle reali del compartimento in modo da caratterizzare lo stadio di crescita e di propagazione durante la fase iniziale dell'incendio, fino al raggiungimento di condizioni di flash-over, e valutare i tempi con i quali tale dinamica si realizza. Con l'impiego di strumentazione e caratterizzazioni dei materiali supplementari, è possibile ottenere uno scenario di riferimento da utilizzare come input del modello della sorgente dell'incendio nei codici di calcolo per la simulazione numerica della dinamica dell'incendio. Per illustrare con un esempio, si farà riferimento ad una prova condotta nei laboratori della Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica in un ambiente avente dimensioni 4.0 m (profondità) x 2.70 m (larghezza) x 2.4 m (altezza), rivestito con pannelli laterali ed a soffitto di cartongesso. La larghezza e l'altezza interna riproducono le dimensioni effettive della sezione di una carrozza MDVC. Sono stati utilizzati cinque sedili, posizionati in modo da ricostruire una porzione d'angolo del compartimento, due plafoniere e quattro tendine (Figura 2).



Figura 2. Interno della sezione di prova e ricostruzione 3D dell'interno del compartimento

L'innesco utilizzato è rappresentato da due fogli di giornale posizionati in corrispondenza del sedile singolo. Solo quando posizionato al di sopra della seduta del sedile - e non quando posta sul pavimento in corrispondenza del sottoscocca del sedile - tale sorgente di innesco è riuscita a determinare condizioni di autosostentamento della combustione e, nel caso specifico, di propagazione ai quattro sedili adiacenti. Le temperature dello strato di gas caldi sono state misurate con quattro schiere di termocoppie. Ciascuna schiera era composta da due termocoppie posizionate a 200 ed a 1000 mm dal soffitto. La pianta e la sezione dell'ambiente di prova con la posizione della strumentazione e dei sedili è riportata in Figura 3.

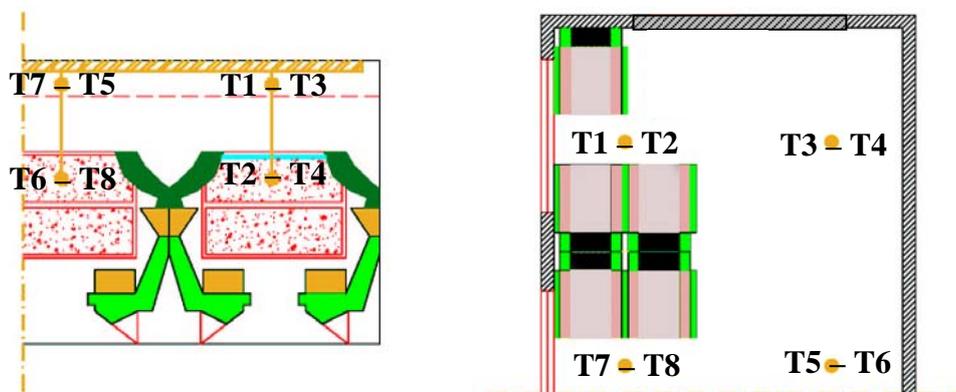


Figura 3. Pianta e sezione dell'ambiente di prova con la disposizione dei sedili e delle termocoppie

I grafici delle temperature registrate nel corso della prova sono presentati in Figura 4.

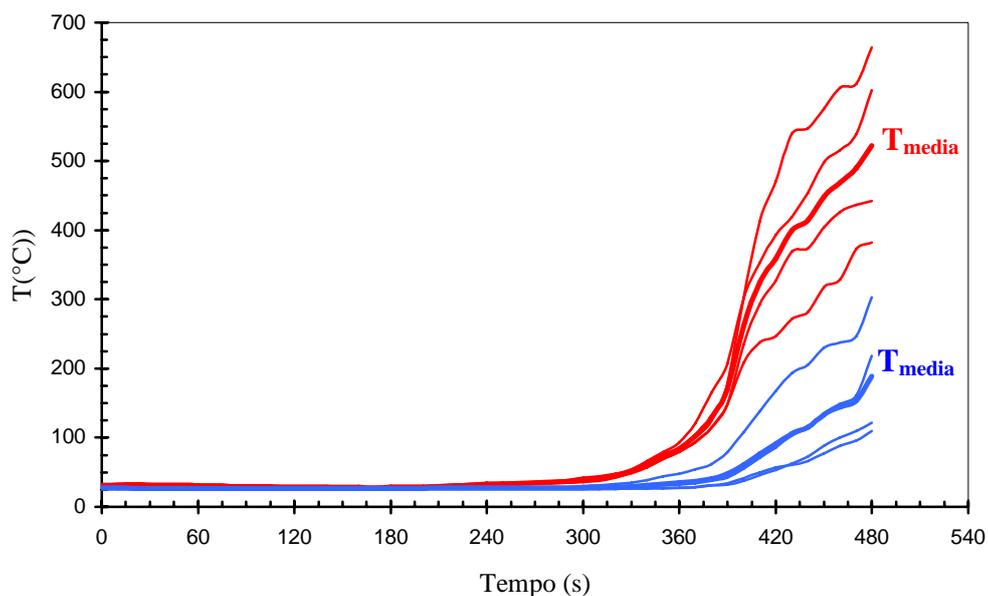


Figura 4. Profilo delle temperature registrate durante la prova in scala reale

Lo strato di gas caldi ha raggiunto la quota delle termocoppie poste a 0.2 m al di sotto del soffitto dopo circa 360 secondi dall'accensione dei fogli di giornale. Dopo il collasso parziale del controsoffitto, avvenuto dopo 480 secondi dall'inizio della prova, le schiere di termocoppie si sono spostate così da determinare la perdita di significato di tutte le registrazioni di temperatura rilevate dopo tale evento. La sequenza delle immagini video riportata in Figura 5 mostra quanto rapidamente l'incendio si propaga dopo una fase relativamente lunga di induzione, nel caso specifico pari a circa sei minuti, durante il quale la produzione di fumo e calore è relativamente modesta.



Figura 5. Istantanee tratte dalle riprese video dell'esperimento in scala reale. L'intervallo di tempo trascorso dall'innesco è indicato nella parte inferiore sinistra di ciascuna immagine.

Dalle riprese video del test, effettuate con due telecamere, una esterna ed una interna, è stato possibile trarre le seguenti osservazioni circa la propagazione della fiamma:

- a 0:46: lo schienale del sedile singolo viene innescato;
- a 4:05: la fiamma comincia a lambire il poggiatesta con un aumento della produzione di fumo;
- a 5:25: inizia ad innescarsi il bracciolo destro del sedile singolo;
- a 5:42: la tendina posta accanto al sedile singolo comincia a plasticizzare con successivo sgretolamento, senza partecipare direttamente alla combustione;
- a 6:15: il poggiatesta comincia a gocciolare, tale fenomeno porterà all'innescò della scocca di materiale plastico posta sotto il sedile singolo;
- a 6:35: la fiamma comincia a lambire il soffitto;
- a 6:53: la plafoniera, posta al di sopra del sedile in fiamme, rammollisce e cade;
- a 7:30: si nota l'inizio della vaporizzazione dei sedili posti frontalmente a quello singolo;
- a 8:30-9:00: parziale collasso del controsoffitto e raggiungimento di condizioni di flashover.

4. SIMULAZIONI NUMERICHE DELLA DINAMICA DELL'INCENDIO

Le osservazioni inerenti la modalità di propagazione della fiamma ed i dati sulla temperatura dei gas (o di flussi radianti o di concentrazioni di specie gassose o di densità ottica dei fumi) ottenuti con l'esecuzione di prove di laboratorio in scala reale permettono di verificare e controllare le previsioni numeriche della dinamica dell'incendio. L'attendibilità con cui la simulazione è in grado di riprodurre l'esperimento in scala reale è un indice della qualità della simulazione e della possibilità di estendere l'utilizzazione dei risultati del modello applicato all'analisi della specifica carrozza. In generale, si propone di seguire il seguente approccio metodologico all'analisi della dinamica dell'incendio. All'inizio è utile descrivere, anche con sketches, le condizioni osservate nel test in scala reale ritenute utili per avere una visione globale del particolare comportamento al fuoco osservato. In questa fase l'analisi è mirata a fissare lo scenario di riferimento da utilizzare come punto di partenza per il successivo approfondimento (di qui il titolo "Analisi e Scenario", par. 4.1). Successivamente si procede a definire la "sequenza temporale degli eventi" registrati durante l'esecuzione del test e, tramite il ricorso ai "principi primi" (equazioni termofluidodinamiche e correlazioni sperimentali del plume, nella fase pre-flashover, e del flashover nello stato di transizione), si tenta di "catturare" gli elementi essenziali dell'energetica del fenomeno. E' la fase in cui è possibile definire i dati di input (ad es. nella fase preflashover l'evoluzione dinamica della sorgente dell'incendio) da utilizzare nel modello di calcolo, se ne valutano le risultanze (ad es. temperature calcolate dello strato di gas caldi) e si procede ad un esame di sensitività dei dati di input per approssimare sempre più i valori misurati (di qui il titolo "Tuning", par. 4.2). Per ultimo, si passa alla descrizione dei risultati ottenuti con la simulazione numerica dell'incendio con l'impiego del modello selezionato (ad es. nel presente studio il software FAST, sviluppato e reso disponibile dal NIST [4],[5],[6]). E' la fase in cui le temperature ottenute con il modello numerico riproducono quelle misurate nel test in scala reale (da qui il titolo "Modello numerico della dinamica dell'incendio", par. 4.3).

4.1 Analisi e scenario

Nella definizione delle condizioni da utilizzare nella progettazione della prova in scala reale (geometria del simulacro che descrive la carrozza ferroviaria, ventilazione disponibile e sorgente di ignizione) è opportuno fare riferimento a quanto stabilito nelle norme di prova per la valutazione del comportamento al fuoco (UNI CEI 11170 o prCEN/TS 45545). Ai fini dell'esecuzione di tali test, l'arredo interno della carrozza può essere limitato ai soli sedili, essendo riconosciuto secondario il contributo degli altri elementi combustibili di arredo e delle finiture delle pareti e del pavimento. Successivamente è necessario effettuare un'analisi al fine di:

- ipotizzare una sequenza ("flow chart") della fase di sviluppo dell'incendio, da verificare in seguito sulla base dei risultati ottenuti (Figura 6, con riferimento alle condizioni utilizzate nel test descritto nel par. 3);
- stabilire il modello fuoco (da utilizzare come input dei modelli numerici) avendo come guida i dati ottenuti nel test in scala reale;
- valutare i risultati ottenibili con un modello numerico, 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.

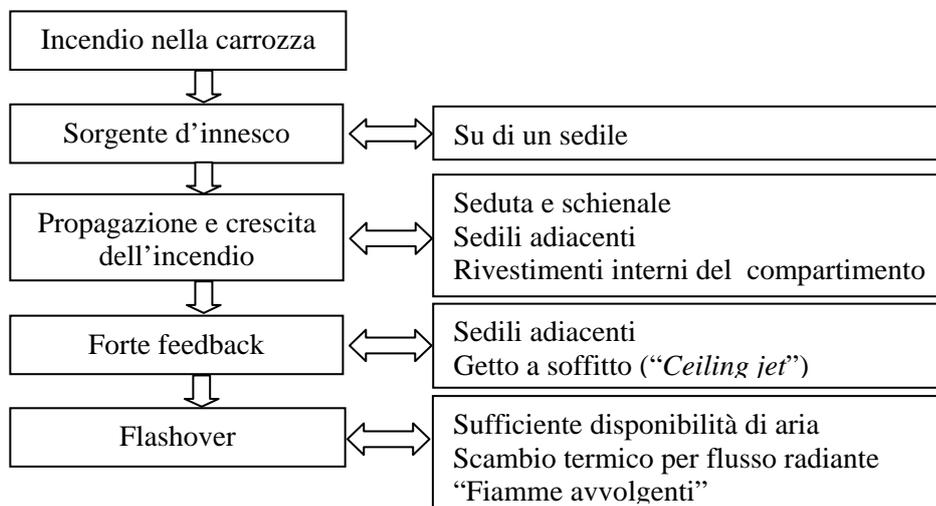


Figura 6. Schema di flusso delle fasi di sviluppo dell'incendio in una carrozza.

Sulla base della sequenza degli eventi registrati nelle riprese della prova in scala reale, è possibile preparare uno sketch (ad es. vedi Figura 7, con riferimento alla prova descritta nel par. 3): ciò è di grande aiuto per sintetizzare in modo semplice ed immediato le caratteristiche dell'incendio nella specifica carrozza esaminata.

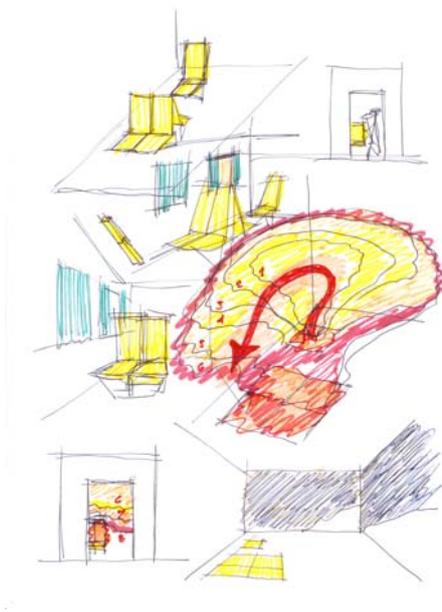
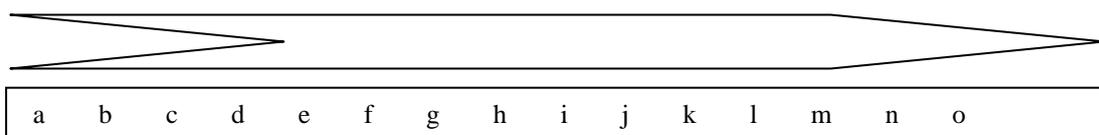


Figura 7. Sketch della dinamica della prova in scala reale

4.2 Tuning

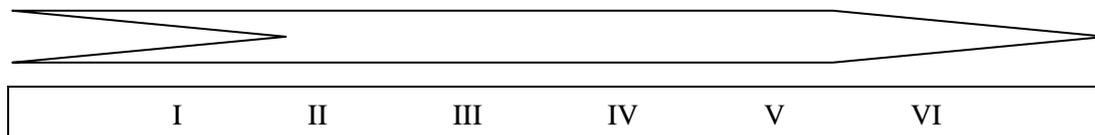
Il passo successivo consiste nell'organizzare e pianificare un'appropriata descrizione dell'incendio nella simulazione numerica. Il codice utilizzato nelle elaborazioni presentate in questo studio è il programma FAST, sviluppato dal National Institute of Standards and Technology, specifico per le simulazioni di incendi. Prima di procedere nei calcoli è necessario definire una "sequenza temporale degli eventi" accaduti nel test in scala reale, stabilita sulla base delle riprese effettuate con le videocamere. In tal modo è possibile fissare una prima sequenza temporale degli eventi, mostrata in Figura 8 (con riferimento alle condizioni utilizzate nel test descritto nel par. 3), in cui sono illustrati i principali eventi osservati.



- a. innesco dell'incendio (su un sedile singolo);
- b. inizia la produzione di fumo;
- c. finisce la combustione del materiale utilizzato per l'innesco; lenta combustione della seduta;
- d. combustione dello schienale;
- e. combustione del poggiatesta, incremento della produzione di fumo;
- f. l'altezza della fiamma supera l'altezza del sedile;
- g. ignizione del bracciolo destro del sedile;
- h. danneggiamento della tendina adiacente alla finestra posta in corrispondenza del sedile in fiamme;
- i. gocciolamento dal poggiatesta, ignizione del sottoscocca del sedile;
- j. la fiamma lambisce il soffitto;
- k. rammollimento e caduta della plafoniera;
- l. vaporizzazione dei sedili posti innanzi al sedile in fiamme;
- m. fine della registrazione delle temperature, a causa del parziale collasso del controsoffitto;
- n. ignizione dei due sedili adiacenti a quello in fiamme;
- o. incendio generalizzato.

Figura 8. Sequenza temporale degli eventi osservati nella prova in scala reale.

Una volta definita la sequenza temporale, è possibile procedere ad esaminare i “principi primi” (equazioni termofluidodinamiche e correlazioni sperimentali del plume, nella fase pre-flashover, e del flashover nello stato di transizione) della dinamica dell’incendio associati ai singoli eventi descritti nella sequenza stessa. Tale associazione permette di definire una nuova sequenza, in cui gli eventi registrati durante il test in scala reale vengono espressi in termini di energetica dell’incendio. Questa nuova sequenza è riportata in Figura 9 (con riferimento alle condizioni utilizzate nel test descritto nel par. 3).



- I. inizio dell’incendio;
- II. ignizione del materiale combustibile costituente una seduta;
- III. altezza della fiamma;
- IV. un sedile in fiamme;
- V. più di un sedile in fiamme;
- VI. flashover.

Figura 9. Sequenza dell’energetica dell’incendio in una carrozza

In tal modo, non solo è possibile “catturare” gli aspetti essenziali dell’energetica dell’incendio ma anche la descrizione della sorgente dell’incendio da utilizzare nelle simulazioni numeriche per riprodurre, con un processo di affinamenti successivi, i dati sperimentali (tipicamente costituiti dalle registrazioni delle temperature dello strato di gas caldi misurate dalle termocoppie).

4.3 Modello numerico per la simulazione dell’incendio

Il passo finale consiste nell’ottenere un accordo delle predizioni del modello numerico con i dati sperimentali (tipicamente riguardanti le temperature dello strato di gas caldi) registrati nel corso del test in scala reale descritto nel paragrafo 3. I dati di input dei modelli numerici sono relativi alla configurazione geometrica ed alla sorgente dell’incendio. La prima è stata specificata sulla base delle dimensioni del simulacro utilizzato nel test in scala reale. La seconda è stata ricostruita sulla base delle osservazioni sperimentali disponibili (riprese video e misure di temperatura), in modo da riprodurre al meglio la dinamica osservata. Tale operazione può essere ottenuta anche con l’utilizzo di modelli semplificati, quali FAST, come illustrato nella figura 10, che riporta l’andamento temporale dell’evoluzione della temperatura dello strato di gas caldi e rappresenta l’ottimizzazione finale raggiunta variando opportunamente la curva di crescita dell’incendio.

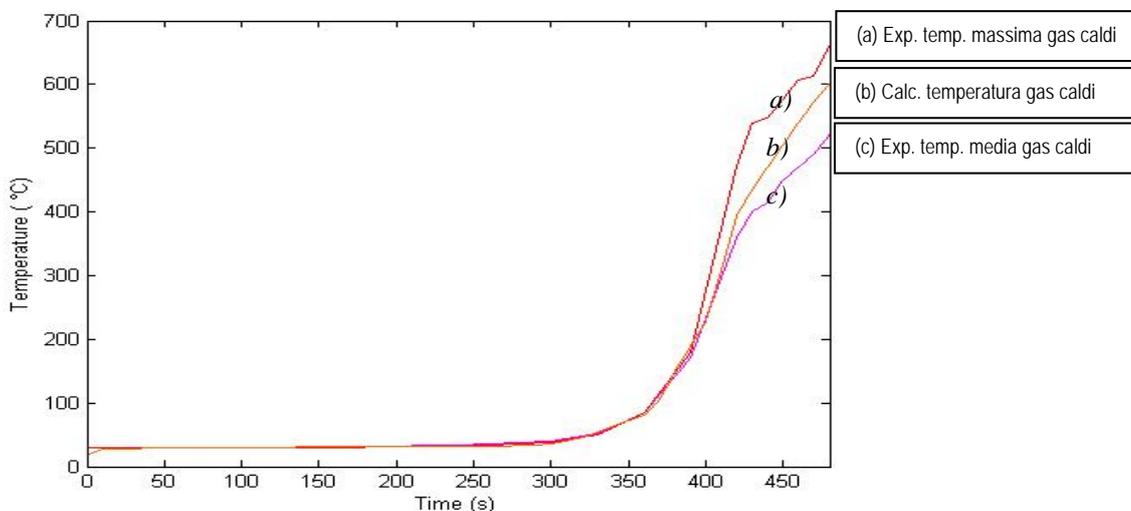


Figura 10. Profilo delle temperature dello strato di gas caldi (calcolato vs sperimentale)

Tale risultato è stato reso possibile dal continuo feedback fra le informazioni ottenute nel corso del lavoro e quelle raggiunte negli steps precedenti, importanti anche per la comprensione e la conseguente descrizione delle interazioni della dinamica dell'incendio con l'involucro del compartimento e con le condizioni di ventilazione. In tal modo, non solo è possibile trovare un buon accordo fra i valori puntuali della temperatura in funzione del tempo ma anche della velocità di aumento della temperatura in funzione del tempo. La temperatura dello strato dei gas caldi calcolata con l'impiego del modello numerico è simile – intermedia – fra la massima e la media misurata dalle termocoppie posizionate a due livelli sotto il soffitto nel test in scala reale. Il buon accordo fra le simulazioni numeriche ed i dati sperimentali si riferisce non solo alle temperature dello strato dei gas caldi, ma anche alla corretta valutazione dello stadio critico di transizione caratteristico degli incendi in compartimenti: lo stadio di *flashover*.

Ciò consente di fondare il modello della sorgente dell'incendio da utilizzare in simulazioni più complesse che riproducano la integrale geometria della carrozza e le condizioni di ventilazione.

Come noto, la dinamica della crescita dell'incendio può essere solo stimata a priori sulla base delle caratteristiche dello scenario analizzato. Ad es. è possibile ricorrere a modelli di crescita di tipo *t-squared*, i quali tuttavia non garantiscono sempre la perfetta rispondenza della predizione dello sviluppo dell'incendio per lo specifico caso esaminato (ad es. ove si verificano transizioni da un tipo di crescita ad un altro, ad es. da *fast* ad *ultrafast*).

Nel caso specifico esaminato, all'istante in cui cessa di essere possibile l'utilizzo delle registrazioni delle temperature (a causa del crollo parziale del controsoffitto), in prossimità del raggiungimento dello stadio di flashover, la simulazione non ha più evidenze sperimentali su cui fare affidamento. E' opportuno precisare che in assenza di misure dirette dei parametri critici della dinamica dell'incendio nella fase post-flashover possono essere comunque fatte alcune assunzioni guidate dalla conoscenza delle proprietà dei materiali combustibili e del modo in cui l'energia può essere rilasciata durante la loro combustione nonché delle proprietà termofisiche delle parti costituenti l'involucro esterno del compartimento. Combinando le osservazioni che possono essere fatte per la fase post-flashover con le informazioni ottenute tramite l'impiego di dati e risultati di simulazioni numeriche per lo stadio di pre-flashover, è possibile effettuare predizioni ragionevoli della dinamica dell'incendio in tutta la sua evoluzione. In tali casi è necessaria l'effettuazione di un'analisi di sensitività per valutare l'incertezza delle stime. Il modello numerico utilizzabile a tal fine può essere del tipo a zone, come FAST o un modello di campo, come FDS.

E' importante notare che benché potenzialmente i modelli di campo possano fornire risultati più dettagliati rispetto a quelli a zone, essi necessitano tuttavia di una quantità e qualità dei dati di ingresso nettamente superiore e di complessa acquisizione, che raramente è disponibile se non per applicazioni di rilievo. Le relative predizioni risultano di conseguenza maggiormente sensibili alle variazioni dei dati di ingresso sicché è necessario fondarle su dati sperimentali e condurre un'appropriata analisi di sensitività, come illustrato nella Figura 11, con dati ricavati mediante l'uso del programma FDS, suddividendo il dominio geometrico in celle cubiche di circa 10 cm di lato e schematizzando le poltrone come un imbottitura di tipo poliuretano, con proprietà desunte dalla scheda tecnica dei materiali.

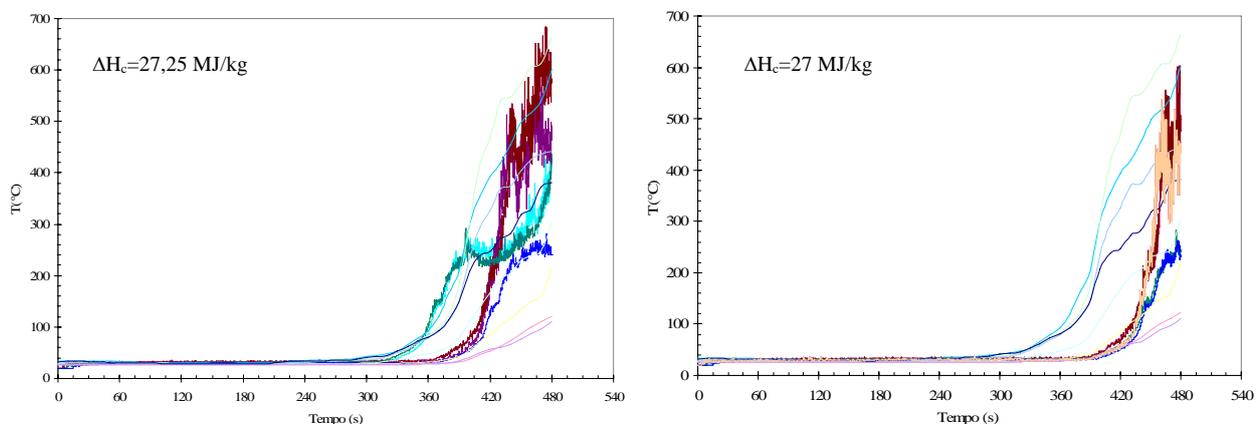


Figura 11. Profilo delle temperature dello strato di gas caldi (calcolato vs sperimentale) ottenuto con due diverse elaborazioni di FDS al variare del ΔH_c dell'imbottitura del sedile da 27,25 a 27 MJ/kg.

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 in una carrozza ferroviaria 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 limitato 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 Dirigente ed il personale del Nucleo Investigativo Antincendi della Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica per il prezioso contributo di materiali ed esperienza che hanno costituito la base per lo sviluppo del presente lavoro. 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] UNI CEI 11170-3:2005, Veicoli ferrotranviari - Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferrotranviari ed a via guidata.
- [2] AA.VV., FIRESTARR Final Report, 2001.
- [3] CEN TS 45545, Railway applications – Fire protection of railway vehicles.
- [4] NIST, CFAST Version 6.0.9 Update, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, <http://cfast.nist.gov/>
- [5] Peacock, R.D. et al., CFAST- Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, NIST Special Publication 1041, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA
- [6] Jones, W. et al., Technical Reference for CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire and Smoke Transport, NIST TN 1431, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA