



## Esperienze di casi reali sull'esodo per fabbricati di grande altezza

*Verifica del sistema di vie di esodo  
mediante l'approccio prestazionale  
all'ingegneria antincendio*

Ing. Luciano Nigro, Ing. Andrea Ferrari  
*nigro@hae.it – ferrari@hae.it*

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi - Roma

## Oggetto dell'analisi

- **Verifica del sistema di vie di esodo di un edificio destinato a grande magazzino**
- **Edificio su 12 livelli, di cui 10 fuori terra**
- **5 scale a servizio dei piani fuori terra**
  - a prova di fumo interne

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 2

## Fasi operative

- **ANALISI PRELIMINARE**
  - Definizione del progetto
  - Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio
  - Individuazione dei livelli di prestazione
  - Individuazione degli scenari di progetto
- **ANALISI QUANTITATIVA**
  - Modelli di calcolo utilizzati nelle simulazioni
  - Caratteristiche del dominio / geometria utilizzati per le simulazioni
  - Risultati delle simulazioni
- **MISURE TECNICHE VOLTE ALL'OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI VIE DI ESODO**
- **SISTEMA DI GESTIONE DELLA SICUREZZA ANTINCENDI (SGSA)**

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 3

## Analisi preliminare

- **OBIETTIVO DI SICUREZZA ANTINCENDIO**
  - Il tempo massimo necessario perché gli occupanti del fabbricato, in seguito ad un evento incidentale iniziatore, possano raggiungere un luogo sicuro evacuando l'edificio dovrà essere tale da non pregiudicarne la sicurezza.
- **Nota: altre finalità sono al di fuori dello scopo dell'analisi (es.: le strutture portanti sono R120)**

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 5

## Analisi preliminare

- **INDIVIDUAZIONE DEI LIVELLI DI PRESTAZIONE**

- Sono state individuate le soglie di accettabilità per la visibilità, per la concentrazione della CO<sub>2</sub> e per la temperatura dei fumi

SOGLIE DI ACCETTABILITÀ		
Specie	Soglia di accettabilità	Descrizione
Visibilità	10 m	Visibilità per oggetti illuminati da fonti esterne, corrispondente a circa 25 m per sorgenti luminose (es. segnali retroilluminati)
Temperatura	50 °C	In condizioni di umidità relativa inferiore al 50% corrisponde ad un tempo di tollerabilità di 2 ore
Anidride carbonica	0.5 %	Limite di sicurezza per esposizione prolungata (la concentrazione del 3 % induce il raddoppio della frequenza respiratoria)
Flusso termico	2.0 kW/m <sup>2</sup>	Esposizione tollerabile per tempi pari a diversi minuti (l'esposizione solare raggiunge 1 kW/m <sup>2</sup> ; 4 kW/m <sup>2</sup> generano bruciate cutanee in tempi brevi)

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 6

## Analisi preliminare

- **INDIVIDUAZIONE DEI LIVELLI DI PRESTAZIONE**

- In ogni caso, il tempo caratteristico di evacuazione degli occupanti dovrà essere inferiore a 5 minuti.
- *“Il tempo caratteristico di evacuazione”* viene definito come il tempo a cui l'ultimo individuo raggiunge il luogo sicuro dinamico, calcolato a partire dal tempo medio di inizio movimento.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 7

## Analisi preliminare

### • INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI DI PROGETTO

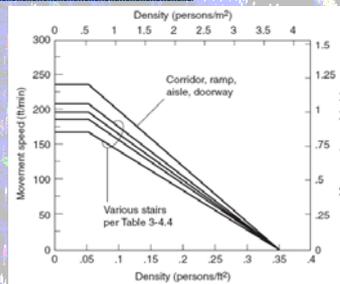
- Scenari di tipo localizzato  
Eventi incidentali che iniziano in un punto preciso del fabbricato e sono percepiti, inizialmente, solo da chi si trova nelle immediate vicinanze dell'evento incidentale
  - Scenario A – Incendio al Piano terra
  - Scenario B – Incendio al 3° Piano
- Scenario di tipo generalizzato  
Eventi incidentali che possono essere percepiti da tutti nello stesso istante
  - Scenario C – Evento esterno (grande boato o terremoto)

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 8

## Analisi preliminare

### • ASPETTI COMUNI A TUTTI GLI SCENARI

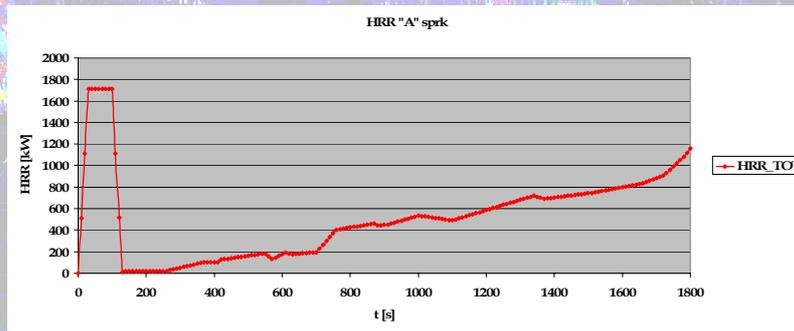
- Caratteristiche generali relative all'esodo
- Velocità degli individui e curva Velocità/Densità
- Popolazione: 4014 individui
- Uscite dal piano ed uscite di sistema
- Sistemi attivi considerati nelle simulazioni
  - Impianto sprinkler
  - Impianto di rivelazione fumi
  - Interblocchi impianto di ventilazione / condizionamento



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 9

# Analisi preliminare

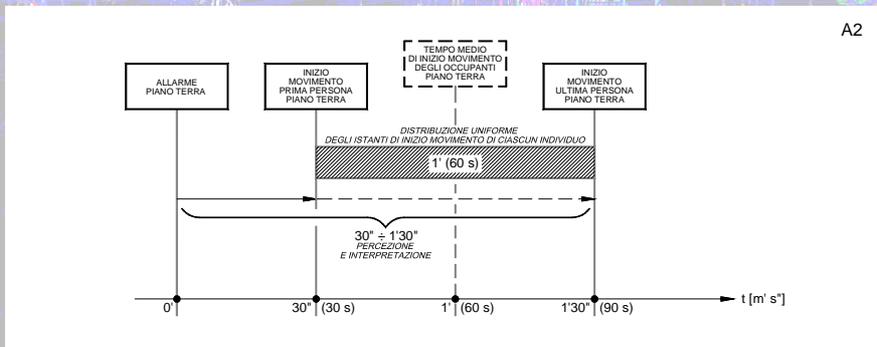
- **SCENARIO A - INCENDIO AL PIANO TERRA**  
 - Modellazione dell'incendio



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 10

# Analisi preliminare

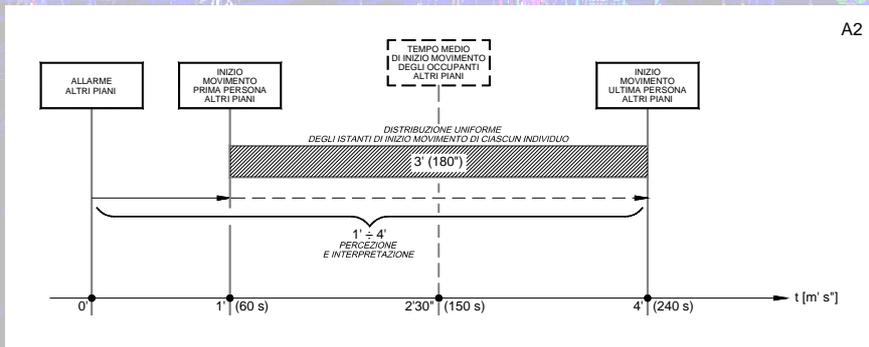
- **SCENARIO A - INCENDIO AL PIANO TERRA**  
 - Modellazione dell'esodo al Piano terra (BSI PD 7974-6)



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 11

## Analisi preliminare

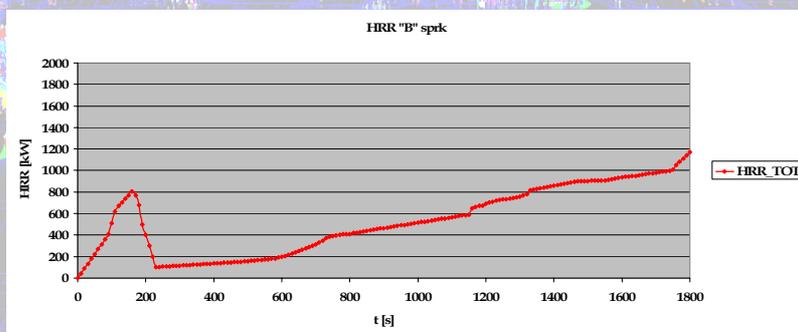
- **SCENARIO A - INCENDIO AL PIANO TERRA**
  - Modellazione dell'esodo agli altri piani (BSI PD 7974-6)



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 12

## Analisi preliminare

- **SCENARIO B - INCENDIO AL 3° PIANO**
  - Modellazione dell'incendio

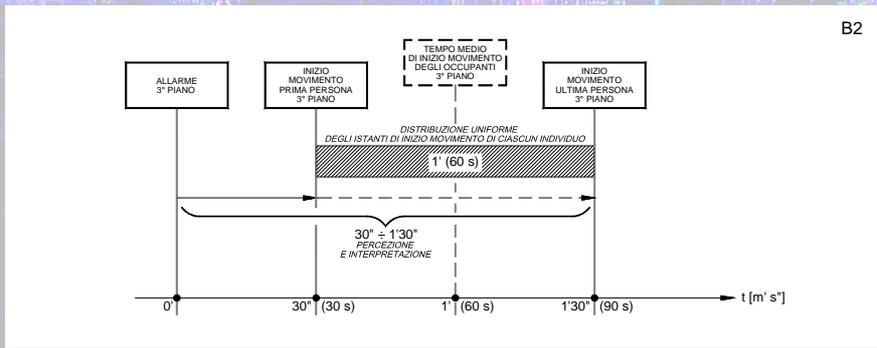


L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 13

# Analisi preliminare

## ● SCENARIO B - INCENDIO AL 3°PIANO

- Modellazione dell'esodo al 3° Piano (BSI PD 7974-6)

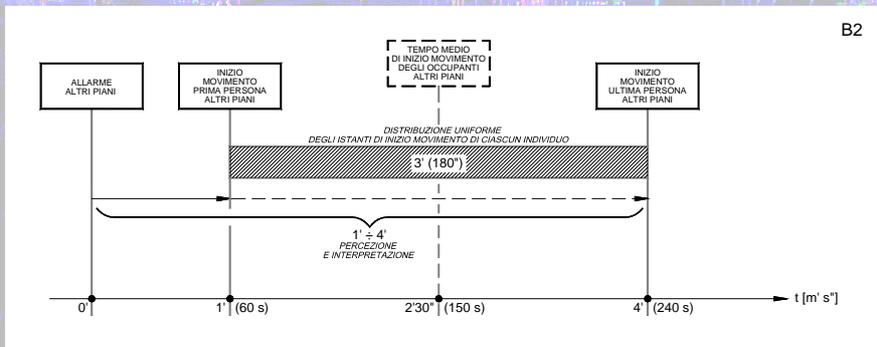


L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza - 11 Settembre 2007 - Istituto Superiore Antincendi - Roma 14

# Analisi preliminare

## ● SCENARIO B - INCENDIO AL 3°PIANO

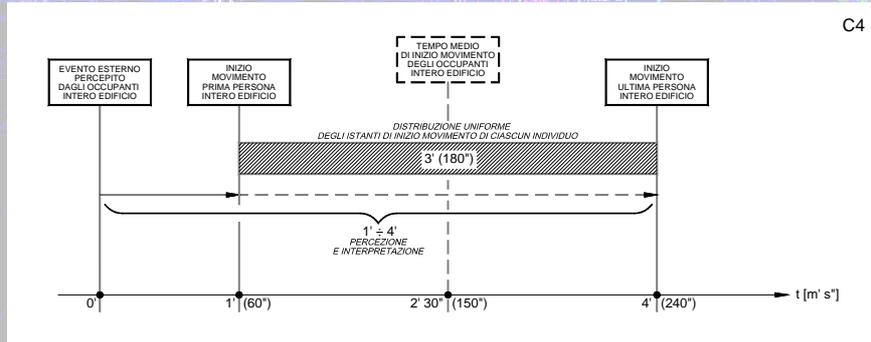
- Modellazione dell'esodo agli altri piani (BSI PD 7974-6)



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza - 11 Settembre 2007 - Istituto Superiore Antincendi - Roma 15

## Analisi preliminare

- **SCENARIO C – Evacuazione incontrollata**  
– Modellazione dell'esodo (BSI PD 7974-6)



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 16

## Analisi quantitativa

- **MODELLI UTILIZZATI NELLE SIMULAZIONI**

- **Simulazione di incendio**

- ECART
- FDS

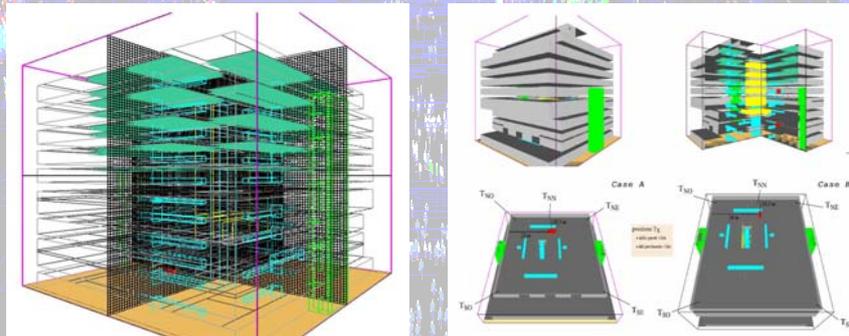
- **Simulazione di esodo**

- STEPS

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 17

## Analisi quantitativa

### • CARATTERISTICHE DOMINIO SIMULAZIONI DI INCENDIO



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 18

## ECART

- Il codice ECART (CESI Ricerca S.p.A.), nato alla fine degli Anni '80 nell'ambito della sicurezza nucleare, è un modello di calcolo che utilizza equazioni di fisica e di chimica di applicabilità generale. Il codice non è commerciale, ma solo oggetto di ricerca - il suo utilizzo è possibile solamente da parte degli sviluppatori, nel contesto dell'attività di sviluppo e validazione.
- Nelle analisi di sicurezza delle installazioni a rischio, ECART ben si presta alla simulazione degli aspetti termici, della formazione di composti chimici in fase gassosa, del trasporto degli aeriformi radiotossici sia in forma vapore che particellare, e ai sistemi di ventilazione e abbattimento.
- La modellistica di questo strumento di calcolo è stata ed è sviluppata da CESI Ricerca S.p.A. in collaborazione con università italiane, come il Politecnico di Milano e il Politecnico di Torino, l'Università di Pisa e svariati organismi di ricerca internazionali (ENEA).
- Nello studio degli incendi confinati, l'analisi del trasporto di massa e calore fornisce le condizioni al contorno per la dinamica del trasporto dei fumi e offre una prima serie di importanti informazioni circa le temperature raggiunte dai materiali coinvolti.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 19

## FDS

1/2

- FDS è un modello sviluppato dal NIST che risolve numericamente, con metodo ai volumi finiti, le equazioni che governano la reazione di combustione ed i fenomeni di trasporto (di energia, di massa e di quantità di moto), tenendo conto dinamicamente delle mutue interazioni tra i processi, simulando in questo modo l'incendio e prevedendone gli effetti.
- FDS contiene un modello di combustione che, a partire da un dato materiale, permette la modellazione dell'incendio secondo una determinata reazione chimica. La dinamica dell'incendio è poi simulata in base ai parametri che caratterizzano ciascun materiale presente nel dominio di simulazione, ciascuno con le proprie caratteristiche termiche e di reazione all'incendio.
- Il moto dei fumi generati dalla combustione all'interno del dominio di interesse viene calcolato mediante la risoluzione di una forma delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per flussi termici lentamente variabili (Mach inferiore a 0.2).

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 20

## FDS

2/2

- Il modello di turbolenza utilizzato è quello K- $\epsilon$  tipico per la modellazione dei fenomeni di questo tipo ed è costituito da un insieme di due equazioni in cui sono calcolate l'energia cinetica della turbolenza (K) e la sua dissipazione ( $\epsilon$ ).
- FDS è in grado di fornire come dati di uscita, previo un opportuno set-up della simulazione in modo che le quantità di interesse vengano effettivamente calcolate e misurate mediante "termocoppie virtuali", i valori di tutte le variabili, scalari e vettoriali, calcolate in ciascuna delle celle del dominio, utili alla comprensione dei fenomeni ed alla analisi degli effetti (concentrazioni delle specie chimiche, distribuzioni delle temperature / pressioni / velocità dei gas / fumi, visibilità, ...).
- FDS è stato oggetto di numerosi studi di validazione sia interni al NIST sia di enti esterni, pertanto, opportunamente utilizzato, è ritenuto un codice di calcolo di comprovata attendibilità.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 21

## STEPS

1/3

- Capacità di modellare il comportamento degli individui in condizioni normali e di emergenza;
- Possibilità di applicazione per lo studio di ambiti quali uffici, palazzi, musei, centri commerciali, stadi, stazioni, parchi giochi, ecc.;
- Capacità di caratterizzare i parametri di ciascun individuo: velocità (tramite la quale è possibile simulare il comportamento di persone di età o genere differenti, con problemi deambulatori, ecc.), livello di pazienza, corporatura;
- Possibilità di impostare differenti velocità per scale, piani inclinati, ecc.
- Possibilità di definire gruppi o famiglie, con la tendenza a rimanere uniti;
- Ottime capacità di visualizzazione grafica.
  
- Studi di validazione del modello sono disponibili a corredo del programma e mostrano risultati di simulazioni in ottimo accordo con gli esempi di calcolo condotti secondo le procedure indicate nello standard NFPA 130.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 22

## STEPS

2/3

- Durante l'impostazione dello scenario di interesse:
  - vengono definiti i piani ("planes") come oggetti sui quali sono poste le ostruzioni (pareti, colonne, arredamenti, ecc.) e sui quali possono essere collocati gli occupanti.
  - ciascun piano è suddiviso in celle ed il passaggio degli individui da un piano all'altro avviene tramite le uscite dal piano ("plane exits"). L'uscita dal modello avviene invece tramite le uscite di sistema ("system exits").
- All'avvio della simulazione vengono calcolate, tramite un algoritmo ricorsivo, le tabelle di potenziale di ciascuna uscita (sia essa di piano o di sistema) partendo da un potenziale nullo per le celle che contengono l'uscita. Se una cella è occupata da un'ostruzione, essa è considerata bloccata, il suo potenziale è definito pari a -1 ed essa deve essere aggirata per poter raggiungere le altre celle.
- Le tabelle di potenziale sono utilizzate per individuare l'uscita più vicina alla cella di interesse: in questa fase vengono considerate unicamente le celle non bloccate, il cui potenziale è sempre positivo. In particolare, minore è il potenziale di una cella rispetto a una certa uscita, minore è la distanza per raggiungere l'uscita dalla cella in questione.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 23

## STEPS

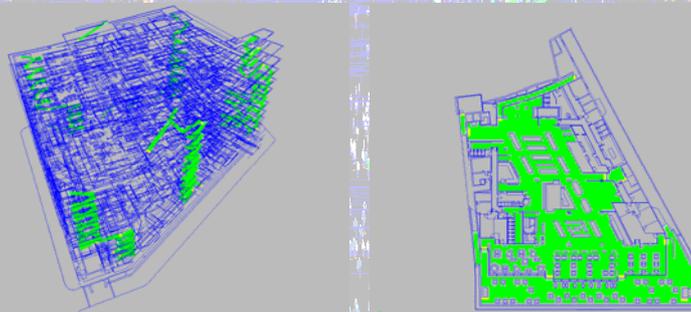
3/3

- Il processo di decisione, che porta a definire verso quale uscita si dirige ciascun individuo, avviene secondo i seguenti passaggi:
  - A partire dalle tabelle di potenziale viene calcolato il tempo necessario per raggiungere ciascuna uscita;
  - Viene calcolato il tempo durante il quale ciascun individuo rimarrà in coda presso ciascuna uscita;
  - I tempi sopra calcolati vengono modificati tenendo in considerazione lo spazio che viene percorso in coda e il fatto che prima che l'individuo raggiunga la coda essa sarà in parte avanzata in conseguenza dell'uscita di alcuni individui alla testa della coda;
  - Vengono presi in considerazione i livelli di pazienza dei vari individui, che influenzano il tempo massimo di coda dell'individuo;
  - Viene infine determinato il "punteggio" di ciascuna uscita, definito come il tempo totale necessario per raggiungerla.
  - L'individuo si dirige quindi verso l'uscita con il punteggio più basso.
  - È inoltre possibile definire la percentuale di conoscenza di ogni uscita da parte di ogni tipologia di individuo: questo permette di tenere conto del fatto che individui che non siano familiari con la struttura in cui si trovano possono non essere consapevoli dell'esistenza di determinate vie di esodo.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 24

## Analisi quantitativa

- CARATTERISTICHE GEOMETRIA  
SIMULAZIONI DI ESODO



L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 25

## Analisi quantitativa

### • RISULTATI SIMULAZIONI DI INCENDIO

- In tutti gli scenari gli effetti dell'incendio sono tali da manifestarsi nei primi minuti solo in prossimità del focolaio (effetti diretti dell'incendio), mentre il resto del piano e gli altri piani sono raggiunti in maniera apprezzabile dai prodotti di combustione in tempi superiori alla decina di minuti

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 26

## MISURE DI L'OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI VIE DI ESODO

- **MISURE RIENTRANTI NEL PIANO DI RIORDINO DELLE VIE DI ESODO**
  - Permettere agli occupanti del piano coinvolto dall'incendio di abbandonarlo raggiungendo un luogo sicuro dinamico nel più breve tempo possibile senza subire possibili ritardi lungo le vie di esodo verticali;
  - Permettere agli occupanti dei piani non direttamente interessati dall'incendio di evacuare l'edificio nel più breve tempo possibile.
  - Limitare il numero di persone presenti ai piani fuori terra al valore di affollamento verificato, mediante l'installazione di dispositivi di conteggio degli occupanti, e con procedure che impediscano l'accesso di clientela in caso di superamento di tale soglia.

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 35

## MISURE DI L'OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI VIE DI ESODO

- **INTERVENTI TECNICI VOLTI AD IMPLEMENTARE LE MISURE DI RIORDINO**
  - Impianti di ventilazione e meccanismi di interblocco
  - Impianto di illuminazione di sicurezza
  - Impianto di diffusione sonora - Informazione della clientela
  - Sostituzione porte/sportelli di piano vani corsa di alcuni ascensori
  - Impianti idrici antincendio
    - Protezione manuale
    - Protezione automatica
  - Mezzi di estinzione portatili
  - Impianto di rilevazione ed allarme
  - Segnaletica di sicurezza
  - Sistema contapersone atto a monitorare in tempo reale l'affollamento dei piani fuori terra

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 36

## SISTEMA DI GESTIONE DELLA SICUREZZA ANTINCENDI

- **ORGANIZZAZIONE DEL PERSONALE**
  - RUOLI COINVOLTI IN ATTIVITÀ RILEVANTI AI FINI DELLA SICUREZZA
- **IDENTIFICAZIONE DEI PERICOLI DERIVANTI DALL'ATTIVITÀ**
- **CONTROLLO OPERATIVO E GESTIONE DELLE MODIFICHE**
- **CONTROLLO DELLE PRESTAZIONI**
- **MANUTENZIONE DEI SISTEMI DI PROTEZIONE**
- **CONTROLLO E REVISIONE**

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi – Roma 37



**Esperienze di casi reali  
sull'esodo per fabbricati di  
grande altezza**

*Grazie per la  
cortese attenzione*

**Ing. Luciano Nigro, Ing. Andrea Ferrari**  
*nigro@hae.it – ferrari@hae.it*

L'Esodo dai Fabbricati di Grande Altezza – 11 Settembre 2007 – Istituto Superiore Antincendi - Roma