



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA CIVILE

Tesi di Laurea Magistrale

Verifica e comportamento di strutture e
infrastrutture in caso di incendio: creazione
di interfaccia tra simulazione CFD e FEM

Relatore

Prof. Giuseppe Marano

Correlatore

Prof. Amedeo Manuello

Bertetto

Ing. Jonathan Melchiorre

Supervisore aziendale

Ing. Michele Fronterre

Candidato

Eris Prifti

Matricola 279188

A.A. 2023/2024

*Ringrazio la mia famiglia, specialmente i miei genitori che mi hanno sempre sostenuto
nel mio percorso di vita.*

*Un ringraziamento speciale va all' Ing. Michele Fronterre che ha creduto in me e ai
miei colleghi di lavoro, ai professori che mi hanno sostenuto nel mio percorso formativo e
tutti gli amici e parenti.*

Sommario

Nella presente tesi magistrale viene analizzato il comportamento di una struttura in acciaio esposta all'azione di incendio durante la fase di esercizio dell'opera tenendo in conto la variazione delle proprietà meccaniche del materiale durante il transitorio termico. Pertanto, la struttura oltre i carichi gravanti durante la fase di esercizio è soggetta anche all'azione di incendio.

Si analizza il comportamento chimico-fisico dell'incendio, la propagazione del calore e la riduzione della capacità portate degli elementi strutturali all'aumentare della temperatura del materiale basandosi su studi teorici e norme tecniche.

È stato utilizzato un approccio di tipo prestazionale/ingegneristico per valutare l'effetto che l'incendio produce nello spazio circostante, svolgendo un'analisi di tipo fluidodinamico (CFD) mediante l'utilizzo del software di calcolo FDS. Mentre il comportamento della struttura durante il transitorio termico è stato valutato mediante un'analisi agli elementi finiti (FEM) tramite l'utilizzo del software di calcolo SAFIR.

Si prosegue nella lettura una descrizione dei software di calcolo utilizzati, insieme ai pre-processor utili a creare i dati di input facilitando il processo grazie alla loro interfaccia grafica e post-processor in grado di analizzare i risultati ottenuti dai software di calcolo.

Una volta ottenuti i risultati dell'analisi strutturale dall'analisi FEM si procede alla verifica della struttura, controllando lo stato tensionale durante il transitorio termico, controllare eventuali cedimenti o eventuale crollo dell'intera struttura.

L'obiettivo finale è quello di creare una interfaccia grafica utile per creare i sensori in prossimità degli elementi strutturali che vanno a misurare la temperatura-tempo in prossimità della struttura durante l'analisi CFD, convertire i risultati della temperatura-tempo ottenuto dai sensori in formato compatibile con il software di calcolo strutturale (FEM), e infine automatizzare il processo a tutti gli elementi strutturali che presentano sezioni e andamento di temperatura-tempo differenti.

3.2.1.	<i>Analisi termica e meccanica</i>	- 39 -
4.	DESCRIZIONE DEI SOFTWARE DI CALCOLO	- 41 -
4.1.	ANALISI TERMICHE MEDIANTE SOFTWARE FDS	- 41 -
4.1.1.	<i>Preprocessore Pyrosim™</i>	- 41 -
4.1.2.	<i>FDS</i>	- 42 -
4.1.3.	<i>Results Pyrosim</i>	- 42 -
4.2.	ANALISI TERMO-MECCANICHE MEDIANTE SOFTWARE SAFIR™	- 42 -
4.2.1.	<i>Preprocessore GmSAFIR</i>	- 43 -
4.2.2.	<i>SAFIR™</i>	- 44 -
4.2.3.	<i>Post-processore Diamond</i>	- 50 -
4.3.	SOFTWARE CFD_FEM_V0.....	- 50 -
5.	CASO STUDIO	- 52 -
5.1.	ANALISI FLUIDODINAMICA	- 52 -
5.1.1.	<i>Geometria</i>	- 52 -
5.1.2.	<i>Scenari di incendio</i>	- 53 -
5.1.3.	<i>Curva HRR di progetto</i>	- 54 -
5.1.4.	<i>Combustibile, griglia di calcolo e periodo di osservazione</i>	- 55 -
5.1.5.	<i>Scambio termico con superfici solide</i>	- 56 -
5.1.6.	<i>Modello CFD</i>	- 56 -
5.1.7.	<i>Sensori di temperatura</i>	- 57 -
5.2.	ANALISI STRUTTURALE	- 58 -
5.2.1.	<i>Geometria</i>	- 58 -
5.2.2.	<i>Materiali</i>	- 58 -
5.2.3.	<i>Analisi dei carichi</i>	- 59 -
5.2.4.	<i>Periodo di osservazione</i>	- 60 -
6.	RISULTATI	- 61 -
6.1.	RISULTATI ANALISI CFD.....	- 61 -
6.1.1.	<i>Scenario 1</i>	- 61 -
6.1.1.1.	Andamento dei fumi	- 61 -
6.1.1.2.	Temperatura Adiabatica Superficiale.....	- 64 -
6.1.1.3.	Temperatura dei gas	- 66 -
6.1.1.4.	Irraggiamento termico	- 68 -
6.1.1.5.	Curva Temperatura-Tempo.....	- 70 -
6.1.2.	<i>Scenario 2</i>	- 71 -
6.1.2.1.	Andamento dei fumi	- 71 -
6.1.2.2.	Temperatura Adiabatica Superficiale.....	- 73 -
6.1.2.3.	Temperatura dei gas	- 75 -
6.1.2.4.	Irraggiamento termico	- 77 -
6.1.2.5.	Curva Temperatura-Tempo.....	- 79 -
6.2.	RISULTATI ANALISI FEM.....	- 80 -
6.2.1.	<i>Analisi termica</i>	- 80 -
6.2.2.	<i>Analisi strutturale</i>	- 83 -
6.2.2.1.	Condizione di carico e vincolo.....	- 83 -
6.2.2.2.	Sforzo Normale	- 84 -
6.2.2.3.	Momento flettente	- 89 -
6.2.2.4.	Taglio.....	- 93 -
6.2.2.5.	Deformata strutturale	- 97 -
6.2.3.	<i>Verifica strutturali a caldo</i>	- 102 -
6.2.3.1.	Classificazione della sezione	- 103 -
6.2.3.2.	Comportamento a caldo dei materiali.....	- 103 -
6.2.3.3.	Verifica a taglio.....	- 104 -
6.2.3.4.	Verifica al momento flettente.....	- 105 -
6.2.3.5.	Verifica a sforzo normale (compressione).....	- 106 -

7. CONCLUSIONI	- 107 -
APPENDICE: ANALISI DI SENSITIVITÀ DELLA MESH	- 108 -
BIBLIOGRAFIA	- 110 -

Indice delle figure

FIGURA 1: ENERGIA DI ATTIVAZIONE DELLA COMBUSTIONE	- 6 -
FIGURA 2: TRIANGOLO DEL FUOCO	- 6 -
FIGURA 3: DECORSO DELL'INCENDIO	- 6 -
FIGURA 4: CURVE CONVENZIONALI DI INCENDIO (TEMPERATURA-TEMPO)	- 10 -
FIGURA 5: DILATAZIONE TERMICA DELL'ACCIAIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA EN 1993-1-2:2005	- 17 -
FIGURA 6: CALORE SPECIFICO DELL'ACCIAIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA EN 1993-1-2.	- 18 -
FIGURA 7: CONDUCEBILITÀ TERMICA DELL'ACCIAIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA EN 1993-1-3:2005.	- 19 -
FIGURA 8: MODELLO COSTITUTIVO DELL'ACCIAIO AD ALTE TEMPERATURE EN 1993-1-2:2005... ..	- 19 -
FIGURA 9: VALORI DI RESISTENZA E MODULO ELASTICO PER OGNI RANGE DI DEFORMAZIONE EN 1993-1-2:2005	- 20 -
FIGURA 10: GRAFICO DEI FATTORI DI RIDUZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELL'ACCIAIO ALLE TEMPERATURE ELEVATE	- 21 -
FIGURA 11: FATTORI DI RIDUZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE AD ELEVATE TEMPERATURE	- 21 -
FIGURA 12: CAPACITÀ DI ROTAZIONE PLASTICA DELLA SEZIONE	- 25 -
FIGURA 13: LUNGHEZZA LIBERA DI INFLESSIONE DI COLONNE NEI TELAI CONTROVENTATI	- 28 -
FIGURA 14: FATTORE DI MOMENTO FLETTENTE EQUIVALENTE	- 34 -
FIGURA 15: TEMPERATURA CRITICA AL VARIARE DEL FATTORE DI UTILIZZO	- 35 -
FIGURA 16: SEZIONE TRAVE IN ACCIAIO – FATTORE DI SEZIONE	- 37 -
FIGURA 17: INTERFACCIA GRAFICA GMSAFIR	- 43 -
FIGURA 18: DIAGRAMMA DI FLUSSO SOFTWARE SAFIR	- 44 -
FIGURA 19: ANALISI TERMICA CON SAFIR – PROCESSO DI ITERAZIONE DELLA TEMPERATURA	- 45 -
FIGURA 20: DIAGRAMMA DI FLUSSO – ANALISI TERMICA CON SAFIR	- 46 -
FIGURA 21: EVOLUZIONE DELLO STATO TENSIONALE DURANTE LA PRIMA ITERAZIONE	- 48 -
FIGURA 22: A) ELEMENTO BEAM, B) GRADI DI LIBERTÀ	- 48 -
FIGURA 23: SOFTWARE CFD_FEM_V0 – ANALISI TERMICA	- 51 -
FIGURA 24: SOFTWARE CFD_FEM_V0 – ANALISI MECCANICA	- 51 -
FIGURA 25: STRUTTURA IN VETRO ACCIAIO – VISTA IN SEZIONE	- 52 -
FIGURA 26; STRUTTURA IN VETRO ACCIAIO – VISTA IN ASSONOMETRIA	- 53 -
FIGURA 27: CURVA HRR DI PROGETTO	- 54 -
FIGURA 28: MODELLO CFD – VISTA AA	- 56 -
FIGURA 29: SENSORE DI TEMPERATURA – AST (SOLID,GAS)	- 57 -
FIGURA 30: GEOMETRIA SAFIR – SEZIONI TRASVERSALI	- 58 -
FIGURA 31: COMBINAZIONE DELLE AZIONI – NTC 17/01/2018	- 59 -
FIGURA 32: VISTA CC – SCENARIO 1	- 61 -
FIGURA 33: VISTA PLOT TEMPERATURA ADIABATICA SUPERFICIALE – SCENARIO 1	- 64 -
FIGURA 34: VISTA PLOT TEMPERATURE DEI GAS – SCENARIO 1	- 66 -
FIGURA 35: IRRAGGIAMENTO – SCENARIO 1	- 68 -
FIGURA 36: POSIZIONE DEL SENSORE (SCENARIO 1)	- 70 -
FIGURA 37: CURVA TEMPERATURA-TEMPO	- 70 -
FIGURA 38: VISTA C'C' – SCENARIO 2	- 71 -
FIGURA 39: VISTA PLOT TEMPERATURA ADIABATICA SUPERFICIALE – SCENARIO 2	- 73 -
FIGURA 40: VISTA PLOT TEMPERATURE DEI GAS – SCENARIO 2	- 75 -
FIGURA 41: IRRAGGIAMENTO – SCENARIO 2	- 77 -
FIGURA 42: POSIZIONE DEL SENSORE (SCENARIO 1)	- 79 -

FIGURA 43: CURVA TEMPERATURA-TEMPO	- 79 -
FIGURA 44: ESPOSIZIONE AL FUOCO DELLA STRUTTURA	- 80 -
FIGURA 45: SOLLECITAZIONE STATICA	- 83 -
FIGURA 46: CONDIZIONI DI VINCOLO ESTERNO	- 83 -
FIGURA 47: TRAVE SOLLECITATA A SFORZO NORMALE MAGGIORE	- 87 -
FIGURA 48: TRAVE SOLLECITATA A SFORZO NORMALE MAGGIORE	- 92 -
FIGURA 49: TRAVE SOLLECITATA A SFORZO NORMALE MAGGIORE	- 96 -
FIGURA 50: PUNTI CON SPOSTAMENTO MAGGIORE	- 100 -
FIGURA 51: TRAVI MAGGIORMENTE SOLLECITATI	- 102 -
FIGURA 52: COEFFICIENTE DI RIDUZIONE – TRAVE 1 E 2	- 103 -

Indice delle tabelle

TABELLA 1: ELENCO DEGLI EUROCODICI.....	- 3 -
TABELLA 2: LIVELLI DI PRESTAZIONE	- 4 -
TABELLA 3: PROFILO DI RISCHIO	- 5 -
TABELLA 4: COMPORTAMENTO AL FUOCO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI	- 8 -
TABELLA 5: CONFRONTO APPROCCIO PRESCRITTIVO E PRESTAZIONALE	- 12 -
TABELLA 6: FATTORI DI RIDUZIONE DELL'ACCIAIO.....	- 20 -
TABELLA 7: SOFTWARE UTILIZZATI.....	- 41 -
TABELLA 8: SCENARI DI INCENDIO	- 53 -
TABELLA 9: CRITERIO DI SCELTA DEGLI SCENARI D'INCENDIO.....	- 54 -
TABELLA 10: COMBUSTIBILE	- 55 -
TABELLA 11: GRIGLIA DI CALCOLO	- 55 -
TABELLA 12: CARATTERISTICHE TERMO-FISICHE DEI MATERIALI.....	- 56 -
TABELLA 13: CARATTERISTICHE MECCANICHE ACCIAIO.....	- 58 -
TABELLA 14: ANALISI DEI CARICHI	- 59 -
TABELLA 15: ANDAMENTO DEI FUMI – SCENARIO 1	- 61 -
TABELLA 16: TEMPERATURA ADIABATICA SUPERFICIALE – SCENARIO 1	- 64 -
TABELLA 17: TEMPERATURA DEI GAS – SCENARIO 1	- 66 -
TABELLA 18: IRRAGGIAMENTO – SCENARIO 1.....	- 68 -
TABELLA 19: ANDAMENTO DEI FUMI – SCENARIO 2	- 71 -
TABELLA 20: TEMPERATURA ADIABATICA SUPERFICIALE – SCENARIO 2	- 73 -
TABELLA 21: TEMPERATURA DEI GAS – SCENARIO 2	- 75 -
TABELLA 22: IRRAGGIAMENTO – SCENARIO 2.....	- 77 -
TABELLA 23: ANDAMENTO DI TEMPERATURA NEL SOLIDO	- 81 -
TABELLA 24: ANALISI STRUTTURALE – SFORZO NORMALE	- 84 -
TABELLA 25: ANALISI STRUTTURALE – MOMENTO FLETTENTE	- 89 -
TABELLA 26: ANALISI STRUTTURALE – TAGLIO	- 93 -
TABELLA 27: ANALISI STRUTTURALE – DEFORMATA	- 97 -
TABELLA 28: SPOSTAMENTO NODALE	- 100 -
TABELLA 29: SOLLECITAZIONI MASSIME	- 102 -
TABELLA 30: CLASSE DELLA SEZIONE	- 103 -
TABELLA 31: TEMPERATURA MASSIMA DELL'ELEMENTO STRUTTURALE	- 103 -
TABELLA 32: COEFFICIENTI DI RIDUZIONE DELL'ACCIAIO	- 104 -
TABELLA 33: VERIFICA A TAGLIO	- 104 -
TABELLA 34: VERIFICA AL MOMENTO FLETTENTE.....	- 105 -
TABELLA 35: VERIFICA A SFORZO NORMALE DI COMPRESSIONE	- 106 -
TABELLA 36: DIMENSIONI DELLA GRIGLIA	- 108 -
TABELLA 37: CONFRONTO ANALISI CFD	- 108 -
TABELLA 38: CONFRONTO ANALISI FEM	- 109 -

Introduzione

L'evoluzione nel tempo delle costruzioni in acciaio partendo da strutture semplici ad opere sempre più complesse come ponti, capannoni industriale, tralicci di sostegno in copertura, stadi, a elementi di unione come le unioni bullonate, chiodi etc., ha portato ad interessarsi maggiormente allo studio del suo comportamento strutturale sotto l'azione di incendio grazie alla variazione della resistenza all'aumentare della temperatura.

Lo scopo della presente tesi è trovare un ponte di collegamento tra le simulazioni CFD in grado di valutare l'effetto dell'incendio sugli elementi strutturali, e le analisi FEM in grado di valutare il comportamento della struttura durante il transitorio termico.

L'obbiettivo è la valutazione del comportamento al fuoco di una struttura in acciaio che delimita l'atrio di una stazione metropolitana, partendo da uno scenario di incendio naturale.

Definiti gli scenari di incendio più gravosi si valuta l'andamento di temperatura-tempo in prossimità della struttura oggetto di analisi mediante le simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD) attraverso l'utilizzo del software di calcolo FDS. Gli output sono convertiti in formato leggibile attraverso l'utilizzo del software `cfd_fem_v0`. Il comportamento strutturale è stato valutato mediante l'analisi agli elementi finiti (FEM) attraverso l'utilizzo del software di calcolo Safr.

La tesi è articolata in sette capitoli: nel primo capitolo viene fornita un riquadro normativo che opera in materia di sicurezza antincendio. Nel secondo capitolo si descrive il comportamento termico e meccanico dei materiali da costruzione. Il terzo capitolo raggruppa tutte le verifiche delle strutture in acciaio soggette all'azione dell'incendio secondo le normative vigenti. Nel quarto capitolo si descrivono i software utilizzati durante l'analisi. Nel quinto capitolo è stato analizzato il caso studio riportando le considerazioni fatte prima di svolgere le simulazioni. Nel sesto capitolo si riportano i risultati dell'analisi CFD e FEM. Il settimo capitolo si dedica alle conclusioni.

Grazie a questo lavoro è stato possibile analizzare il comportamento della struttura soggetto all'azione di incendio, quantificando l'effetto dell'incendio.

1. INQUADRAMENTO NORMATIVO ANTINCENDIO E COMPORTAMENTO DELL'INCENDIO

In questo capitolo si pone particolarmente attenzione alle normative vigenti in materia antincendio e di resistenza strutturale soggetto all'azione di incendio.

1.1. Requisiti base delle opere di costruzione

Tra i requisiti base ai quali le opere di costruzione devono soddisfare riguarda i prodotti da costruzione, essi devono essere marcati con apposita marcatura CE.

Nel CPR, Regolamento Prodotti da Costruzione (UE) n. 305/2011, entrato in vigore il 01 luglio 2013, sostituendo la Direttiva 89/106/CEE sui prodotti da costruzione (CPD), definisce le condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione, attraverso i requisiti elencati di seguito:

Resistenza meccanica e stabilità;

- Sicurezza in caso di incendio;
- Igiene, salute e ambiente;
- Sicurezza e accessibilità nell'uso;
- Protezione contro il rumore;
- Risparmio energetico e ritenzione del calore;
- Uso sostenibile delle risorse naturali;

I materiali che riportano la marcatura CE devono essere conformi ai requisiti del Regolamento CPR e corrispondenti Norme Armonizzate.

In particolare, il secondo punto "Sicurezza in caso di incendio" riporta le limitazioni che l'opera di costruzione deve soddisfare:

- La capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;
- La produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere siano limitate;
- La propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata;
- Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti;
- Sia presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso.

La strategia di sicurezza in caso di incendio prevede:

- Ridurre al minimo la probabilità legata all'evento di incendio (prevenzione incendi);

- Valutare la sicurezza degli occupanti e verificare se essa debba essere migliorata mediante l'adozione di sistemi di rilevazione, di allarme e di controllo dell'incendio (sistema di protezione attiva)
- Individuare un sufficiente livello di compartimentazione al fine di impedire la crescita eccessiva dell'incendio all'interno dell'edificio;
- Prevenire la propagazione dell'incendio tra edifici contigui;
- Individuare le condizioni affinché sia possibile l'intervento delle squadre di soccorso.

1.1.1. Normativa di riferimento per verifiche strutturali

Le Norme Tecniche per le costruzioni NTC del 17 gennaio 2018, per la valutazione della resistenza al fuoco delle strutture, rimanda all'applicazione degli Eurocodici (EC) e alle relative appendici contenenti i parametri definiti a livello nazionale (NDP).

In Tabella 1 si riporta un elenco degli eurocodici utilizzati per la verifica di resistenza al fuoco delle strutture.

Tabella 1: Elenco degli eurocodici

Eurocodice	Titolo
UNI EN 1991-1-2:2004	Eurocodice 1 Azioni sulle strutture -Parte 1-2: Azioni in generale – Azioni sulle strutture esposte al fuoco
UNI EN 1992-1-2:2005	Eurocodice 2 Progettazione delle strutture di calcestruzzo Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio
UNI EN 1993-1-2:2005	Eurocodice 3 Progettazione delle strutture di acciaio Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio
UNI EN 1994-1-2:2014	Eurocodice 4 Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio
UNI EN 1995-1-2:2005	Eurocodice 5 Progettazione delle strutture di legno Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio
UNI EN 1996-1-2:2005	Eurocodice 6 Progettazione delle strutture di muratura Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio
UNI EN 1999-1-2:2007	Eurocodice 9 Progettazione delle strutture di alluminio Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio

Tali norme affrontano aspetti di verifica della capacità portante di incendio e inerenti alla compartimentazione, prendendo in esame la protezione passiva di elementi singoli e dell'intero complesso strutturale in presenza di carichi combinati con l'incendio.

1.1.2. Norme tecniche di prevenzione incendi

Le norme tecniche di prevenzione incendi definiscono il parametro essenziale nella valutazione dell'incendio e le misure di prevenzione.

Di seguito si riportano le norme tecniche di riferimento:

- Ministero dell'interno Decreto 16 febbraio 2007
- Ministero dell'interno Decreto 09 marzo 2007
- Ministero dell'interno Decreto 09 maggio 2007
- D.M. 03/08/2015 Norme tecniche di prevenzione incendi
- D.M. 18/10/2019 Norme tecniche di prevenzione incendi

Di fondamentale importanza la misura S2 "Resistenza al fuoco [1]" delle norme tecniche di prevenzione incendio del D.M. 03/08/2015. In Tabella 2, presenti nella misura S2 del decreto sopracitato.

1.1.3. Richieste di prestazione in caso di incendio

In Tabella 2 si riportano i livelli di prestazione [1] attribuibili alle opere da costruzione:

Tabella 2: Livelli di prestazione

Livello di prestazione	Descrizione
I	Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale
II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione
III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio
IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione.
V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa.

Nella norma si riportano le soluzioni progettuali conformi e alternativi per ogni livello di prestazione, per maggiori informazioni si rimanda la lettura al D.M. 03/08/2015.

¹ D.M. 03/08/2015 Codice di prevenzione incendi misura S2 "Resistenza al fuoco"

1.1.4. Determinazione del profilo di rischio

Per determinare il profilo di rischio dell'attività bisogna determinare i seguenti parametri:

Tabella 3: Profilo di rischio

Parametro	Descrizione	Area di competenza
R _{vita}	Profilo di rischio relativo alla salvaguardia della vita umana (vedi nota [2])	Attribuiti a ciascun compartimento dell'attività
R _{beni}	Profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici (vedi nota [3])	Attribuiti all'intera attività
R _{ambiente}	Profilo di rischio relativo alla tutela dell'ambiente (vedi nota [4])	

1.2. Definizione e fenomeno fisico dell'incendio

Per incendio, si intende la combustione autoalimentata ed incontrollata di materiali combustibili presenti in un compartimento. Il principale prodotto della combustione che può determinare ingenti danni alla struttura e persone che si trovano in vicinanza dell'incendio è il calore che si sprigiona durante lo sviluppo dell'incendio.

1.2.1. Combustione

La combustione è una reazione chimica sufficientemente rapida di una sostanza combustibile con un comburente che dà luogo allo sviluppo di calore, fiamme, gas e fumi. Durante la combustione l'energia chimica si trasforma in energia termica, con la trasformazione del combustibile.

La reazione avviene per urto tra le molecole di comburente e combustibile, in forma gassosa. L'urto tra molecole di combustibile e comburente è a bassa temperatura e quindi non si ha l'ignizione.

Affinché la combustione abbia luogo è necessaria una fonte di calore (fiamma, scintille, corpi arroventati) che garantisca un livello di energia superiore all'energia di attivazione correlata alla tipologia di combustibile che alla sua pezzatura.

² D.M. 03/08/2015 capitolo G.3.2.

³ D.M. 03/08/2015 capitolo G.3.3.

⁴ D.M. 03/08/2015 capitolo G.3.4.

Una fonte di innesco che non supera la barriera di attivazione non è in grado di dar luogo al fenomeno di incendio (vedi curva b in Figura 1), pertanto affinché parte il fenomeno di combustione bisogna avere un'energia minima pari all'energia di attivazione.

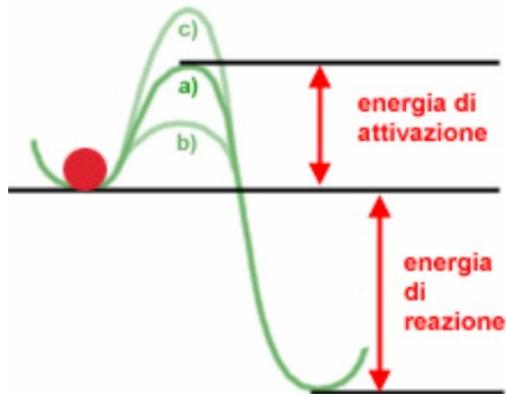


Figura 1: Energia di attivazione della combustione

Dopo la fase di ignizione il calore prodotto dalla combustione è in grado di auto-sostenere l'incendio, formando composti radicali che danno luogo a reazioni intermedie.

La presenza del combustibile, comburente e innesco forma il triangolo del fuoco che permette all'incendio di svilupparsi, al mancare di almeno uno l'incendio si spegne.



Figura 2: triangolo del fuoco

1.2.2. Decorso di un incendio

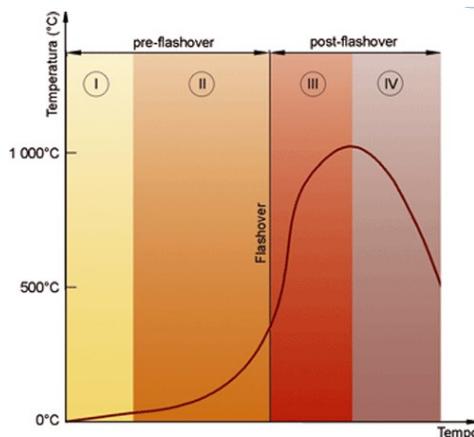


Figura 3: decorso dell'incendio

Il decorso di un incendio è composto da 4 fasi:

- **Fase I (Fase iniziale o di ignizione)** – si verifica quando uno o più oggetti combustibili vengono in contatto con una sorgente di calore;
- **Fase II (Propagazione)** – nella combustione vengono coinvolti altri oggetti combustibili;
- **Fase III (Incendio generalizzato)** – l'incendio si estende a tutti i materiali combustibili presenti;
- **Fase IV (Estinzione o raffreddamento)** – gli effetti dell'incendio diminuiscono a causa del consumo progressivo dei materiali combustibili;

Superato il punto di flashover l'incendio è stato generalizzato a tutti i materiali presenti nel compartimento. Secondo la norma NFPA⁵ si può affermare: “fase dello sviluppo di un incendio al chiuso nel quale tutte le superfici esposte raggiungono la temperatura di accensione più o meno contemporaneamente e il fuoco si propaga rapidamente a tutto il compartimento”.

Per raggiungere il flashover, l'incendio si deve trovare in un ambiente semichiuso o chiuso e in presenza di materiali infiammabili, capaci di estendere l'incendio su tutta la superficie libera del comparto.

1.3. Reazione al fuoco

La reazione al fuoco dei materiali è il comportamento che i materiali presentano durante la combustione, misurando la capacità del materiale di partecipare all'azione termochimica dell'incendio che può essere:

- **Incombustibile:** nessuna reazione al fuoco;
- **Autoestinguente:** comportamento indifferente;
- **Combustibile:** comportamento attivo all'incendio.

La norma italiana armonizzata con le norme europee⁶ classifica la reazione al fuoco dei materiali in sette classi principali (Euro-classi).

⁵ NFPA101: Life safety code 3.3.79.

⁶ Commissione Europea 2000/147/CEE- tutti i prodotti e pavimenti.

1.4. Resistenza al fuoco

La resistenza al fuoco dei materiali è la capacità del materiale di mantenere le proprietà meccaniche inalterate o a livello tale da poter garantire la resistenza strutturale per un tempo determinato.

È richiesta la resistenza al fuoco alle parti strutturali o complesso strutturale che non devono perdere le proprietà meccaniche sotto l'azione termochimica dell'incendio. Garantire inoltre una sufficiente tenuta e isolamento dell'incendio alle aree limitrofe.

Il concetto di resistenza⁷ al fuoco descrive l'attitudine della struttura o del singolo elemento a conservare, secondo un programma tecnico prestabilito e per un tempo determinato, le seguenti caratteristiche:

- **La capacità portante R:** rappresenta l'attitudine di un elemento di costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco.
- **La tenuta E:** rappresenta l'attitudine di un elemento, esposto al fuoco da un lato di esso, a non far passare e produrre fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto. La tenuta è un concetto chiave per garantire l'esodo delle persone che devono lasciare il compartimento esposto al fuoco.
- **L'isolamento termico:** rappresenta l'attitudine di un elemento a ridurre la trasmissione del calore.

Perciò un elemento strutturale si può classificare come segue:

- **Simbolo R:** si identifica un elemento costruttivi che durante l'azione di incendio deve conservare la sua capacità portante (esempio travi o pilastri);
- **Simbolo RE:** si identifica un elemento costruttivo che durante l'azione di incendio deve conservare sia la capacità portante che la tenuta (esempio muro o solaio che hanno funzioni di separazione);
- **Simbolo REI:** si identifica un elemento costruttivo che durante l'azione di incendio deve conservare la capacità portante, tenuta e l'isolamento (muri o solai che devono proteggere una zona dall'effetto dell'incendio)

Tabella 4: Comportamento al fuoco degli elementi strutturali

	Capacità portante	Tenuta	Isolamento
R	x		
RE	x	x	
REI	x	x	x

⁷ UNI CEI EN ISO 13943: Resistenza al fuoco

1.5. Approccio per la progettazione

Il comportamento della struttura o delle opere civili dipende dalla specifica azione che la struttura è soggetta. Le azioni che interessano principalmente la struttura si dividono in due categorie:

- Azione meccanica (esempio: carichi gravanti, forze di espansione termiche impedita, urti, spinta del terreno ...);
- Azione termica (incendio)

La valutazione della resistenza al fuoco delle strutture può essere condotta seguendo due modalità:

- Incendi convenzionali (curve standard temperatura tempo);
- Incendi naturali (curve temperatura-tempo sviluppato attraverso un calcolo CFD).

La definizione della tipologia di incendio definisce l'approccio per la valutazione della sicurezza strutturale:

- un approccio prescrittivo;
- un approccio prestazionale/ ingegneristico.

1.5.1. Approccio prescrittivo

L'approccio prescrittivo è basato sul concetto del rispetto dei requisiti nel progetto che rappresenta la garanzia del raggiungimento dei livelli minimi di sicurezza. I requisiti sono delle regole tecniche, basate su strumenti di calcolo (ad esempio, Eurocodici per il calcolo analitico delle classi REI della struttura, l'utilizzo delle curve standard d'incendio, ecc.) e consistenti in misure preventive e protettive da rispettare come vincoli di progetto e codificate in disposizioni legislative. Nell'approccio prescrittivo non è ammessa una soluzione progettuale alternativa rispetto a quella imposta dal legislatore.

Qualora, per caratteristiche strutturali o architettoniche, risultano non applicabili, la sicurezza antincendio di progetto viene assicurata dall'applicazione di disposizioni suppletive concordate con i VV.F. (procedimento di deroga art. 6 del d.p.r. 151 del 1° agosto 2011).

Questo approccio normalizza eccessivamente le soluzioni poiché esse sono basate su ipotesi generali e, ignorando la specificità del contesto reale, trascurando spesso soluzioni valide, e conducendo a soluzioni spesso molto onerose e di non immediata attuazione.

La definizione degli scenari di incendio convenzionali, a livello internazionale è concordato di utilizzare la curva nominale standard di temperatura-tempo, introdotta dalla norma ISO 834 [8] (riportato in rosso in Figura 4) che presenta il seguente andamento:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

Nel caso di incendi di qualità rilevanti di idrocarburi (riportato in verde in Figura 4) o sostanze con equivalente velocità di rilascio termico, ed esclusivamente per la determinazione della capacità portante delle strutture, la curva di incendio nominale standard deve essere sostituita con la curva nominale degli idrocarburi:

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20$$

Nel caso di incendi sviluppatasi all'interno del compartimento (riportato in azzurro in Figura 4), ma che coinvolgono strutture poste all'esterno, per queste ultime la curva di incendio nominale standard può essere sostituita con la curva nominale esterna:

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20$$

Dove:

θ_g - temperatura media dei gas di combustione [°C]

t - tempo [minuti]

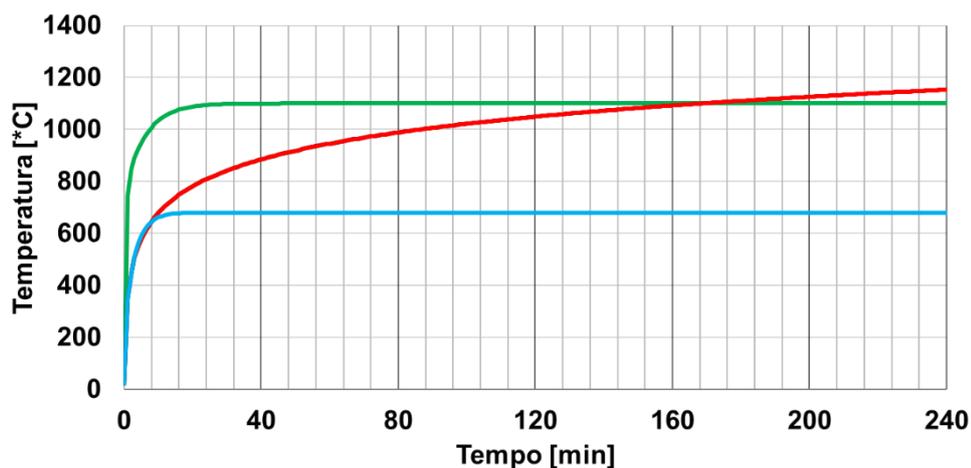


Figura 4: curve convenzionali di incendio (temperatura-tempo)

⁸ ISO 634-1, 1999

1.5.2. *L'approccio prestazionale o ingegneristico*

L'approccio prestazionale è basato sullo studio dell'evoluzione dinamica dell'incendio e sulla prestazione della struttura progettata. L'approccio prestazionale è basato su criteri che caratterizzano l'ingegneria della sicurezza antincendio o Fire Safety Engineering (F.S.E.), su principi ingegneristici, regole e giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano.

Recepito dal quadro normativo italiano con il D.M. 9 maggio 2007 si consolida con le previsioni del Codice di cui al D.M. 03 agosto 2015.

L'approccio prestazionale consiste nella valutazione del rischio incendio mediante la previsione di scenari verosimili di incendio e lo studio delle prestazioni minime del progetto durante l'evoluzione dell'incendio. È in mano al progettista la scelta della misura adeguata al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza da raggiungere, giudicando l'adeguatezza del materiale e del metodo di analisi, assumendo la responsabilità al fine di garantire le prestazioni strutturali e valori soglia.

Progettare con il metodo prestazionale la sicurezza antincendio, significa massima flessibilità nell'individuare le soluzioni tecniche e gestionali finalizzate al raggiungimento del livello di sicurezza accettabile mediante soluzioni diverse da quelle standard e specifiche, meno onerosi ma altrettanto efficaci. La novità dell'approccio è la quantificazione dell'effetto, fino ad oggi si accettavano misure secondo un criterio qualitativo, senza nessuna possibilità di misurare l'impatto effettivo dei singoli strumenti sull'evoluzione dell'incendio.

Il primo passo dell'applicazione dell'approccio prestazionale è la valutazione dell'azione termica mediante l'analisi di scenari di incendio naturali che descrivono qualitativamente l'evoluzione di un incendio ed individuano gli eventi chiave che lo caratterizzano. In pratica bisogna selezionare, tra quelli prevedibili, i più pericolosi di natura strutturale.

1.5.3. *Confronto approccio prescrittivo e prestazionale*

Tabella 5: confronto approccio prescrittivo e prestazionale

	Approccio Prescrittivo	Approccio Prestazionale
Valutazione	Effettuata dal normatore sulla base di criteri di sicurezza e applicazione generale	Effettuata dal progettista identificando: <ul style="list-style-type: none"> - Pericoli di incendio; - Condizioni ambientali; - Caratteristiche degli occupanti;
Soluzioni	Conformi (Per il D.M. 10/03/1998 anche soluzioni alternative a sicurezza equivalente), o eventuali in deroga (previa approvazione del comando VVF).	Individuate a valle degli obiettivi di sicurezza antincendio, dei livelli di prestazione richiesti degli scenari di incendio e dell'applicazione di un adeguato modello di simulazione e verifica del raggiungimento livelli di prestazione
Caratteristiche	<ul style="list-style-type: none"> - Valutazione ex ante - RT (allegata al D.M di P.I.); - Semplicità; - Minore responsabilità del progettista; - Rigidità (oppure deroga); - Limitata autonomia del progettista 	<ul style="list-style-type: none"> - Valutazione del caso reale; - Livelli di prestazione diversi; - Competenza - Maggiore responsabilità del progettista; - Flessibilità; - Autonomia del progettista.

2. COMPORTAMENTO TERMICO E MECCANICO DEI MATERIALI SOGGETTO AL FUOCO

2.1. Introduzione

I materiali da costruzione soggetti ad una variazione di temperatura sviluppano inevitabilmente delle trasformazioni chimiche e fisiche le quali introducono variazioni sostanziali sulle proprietà meccaniche e geometriche dei materiali e compromettono in modo significativo le prestazioni della struttura.

Tra le proprietà meccaniche sono la rigidità e resistenza dei materiali.

Le variazioni geometriche per effetto della presenza di materiale combustibile che bruciando fanno perdere parte della sezione e provocano distacchi dei materiali (effetto spalling).

I materiali come acciaio e calcestruzzo data la bassa quantità di materiali combustibili e cioè di materiali combustibili si limita lo studio solo alle variazioni delle proprietà meccaniche del materiale.

2.2. Trasmissione del calore

La trasmissione del calore nei materiali avviene mediante i prodotti della combustione (gas e fumi) che si producono durante l'incendio e per effetto calore diretto dalla fiamma. La trasmissione avviene quindi per convezione, conduzione e l'irraggiamento.

2.2.1. Convezione

La convezione è lo scambio di calore per mezzo di fluidi, liquidi o gas, tra la temperatura del fluido stesso e la superficie di un solido. Lo scambio termico per convezione si può valutare attraverso la legge di Newton:

$$\dot{q} = h \cdot \Delta T$$

Dove:

- ΔT è la differenza di temperatura, essendo una differenza è valido sia in Kelvin che in °C, tra la superficie del solido e il fluido;
- h coefficiente di trasmissione convettivo del calore misurato in (W/m²K), questo parametro tiene conto della proprietà del fluido, della corrente del fluido, e geometria del solido.

2.2.2. Conduzione

La conduzione permette la trasmissione del calore dalla superficie esterna esposta al fuoco agli strati interni del materiale per semplice contatto e quindi si crea una vibrazione del reticolo del materiale che permette la trasmissione del calore da un corpo più caldo verso quello più freddo fino al raggiungimento dell'equilibrio termico tra i due.

L'equazione di Fourier descrive la propagazione del calore:

$$\nabla^2 T = \frac{c_v \cdot \rho}{\lambda} \frac{dT}{dt}$$

Dove:

- λ è la conducibilità termica del materiale ($\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$);
- c_v calore specifico a volume costante ($\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$);
- ρ densità del materiale (kgm^{-3}).

Il flusso termico è positivo se il gradiente di temperatura è negativo e viceversa. Come si vede nella relazione il flusso di calore è dipendente dalla tipologia di materiale e inversamente proporzionale allo spessore.

2.2.3. Irraggiamento

Il calore viene trasmesso attraverso le onde elettromagnetiche, in grado di viaggiare sia nel vuoto che nei mezzi. L'irraggiamento corrisponde ad una quota importante di trasmissione del calore dall'incendio verso i materiali limitrofi, sia per la trasmissione del calore all'interno del materiale. La quantità di calore emessa da un corpo per irraggiamento è dipendente dalla quarta potenza della temperatura, per tale motivo assume un ruolo importante quanto più è alta la temperatura della sorgente e l'emissività risultante.

Il flusso termico generato dalla superficie emittente si può valutare con la seguente espressione:

$$\dot{q} = \Phi \cdot \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

Dove:

- T_e è la temperatura assoluta della superficie radiante (espresso in Kelvin);
- ε_e l'emissività della superficie radiante;
- Φ è il fattore di configurazione delle due superfici;
- σ costante di Stefan Boltzmann, pari a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Lo scambio termico tra la superficie emittente e la superficie ricevente si può determinare mediante l'espressione:

$$\dot{q} = \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_e^4 - T_r^4)$$

Dove:

- T_r è la temperatura assoluta, espressa in gradi Kelvin, della superficie del materiale ricevente;
- ε è l'emissività risultate delle due superfici, valutabile mediante la seguente formulazione

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_r} + 1}$$

Dove ε_r è l'emissività della superficie ricevente.

Il valore di ε definisce l'efficienza del piano radiante nell'emissione del calore, il valore è compreso tra 0 e 1.

- $\varepsilon=0$, corpo bianco, non c'è nessun scambio termico per irraggiamento tra la superficie emittente e la superficie ricevente.
- $\varepsilon=1$, corpo nero, le due superfici sono in grado di emettere e assorbire tutto il calore.

Di solito i materiali presentano un valore dell'emissività tra 0.7 e 1, pertanto presentano una buona efficienza del piano radiante.

2.3. Comportamento a caldo dell'acciaio al carbonio

L'acciaio strutturale a temperatura ambiente presenta delle proprietà meccaniche rilevanti in rapporto alla massa per unità di volume. All'aumentare della temperatura dei gas che lo circonda, condizionata dall'elevata conducibilità termica esso presenta un incremento di temperatura elevato del materiale stesso e quindi l'insorgenza dei fenomeni di degrado o collassi prematuri strutturali. In genere, l'aumento della temperatura delle strutture in acciaio provoca dilatazioni rilevanti e variazioni notevoli delle proprietà termiche e meccaniche.

2.3.1. Proprietà fisiche e termiche

Le proprietà termiche dell'acciaio sono:

- dilatazione termica;
- calore specifico;
- conducibilità termica;

Dilatazione termica

La dilatazione termica è la proprietà del materiale che esprime la loro tendenza ad aumentare il volume con l'aumentare della temperatura.

In Figura 5 si riporta il grafico della dilatazione lineare in funzione della temperatura fornito dall'Eurocodice [9] per l'acciaio da carpenteria metallica.

La dilatazione termica relativa dell'acciaio $\Delta l/l$, riportato nella norma [9], è così determinata:

- per $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 750^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}$$

- per $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,1 \cdot 10^{-2}$$

- per $860^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a - 6,2 \cdot 10^{-3}$$

Dove:

l - lunghezza dell'elemento in acciaio a 20°C;

⁹ BS EN 1993-1-2:2005

Δl – la variazione di lunghezza dovuta alla variazione di temperatura
dell'elemento;

θ_a – la temperatura dell'acciaio.

In Figura 5 è riportato l'andamento dell'allungamento relativo
dell'acciaio.

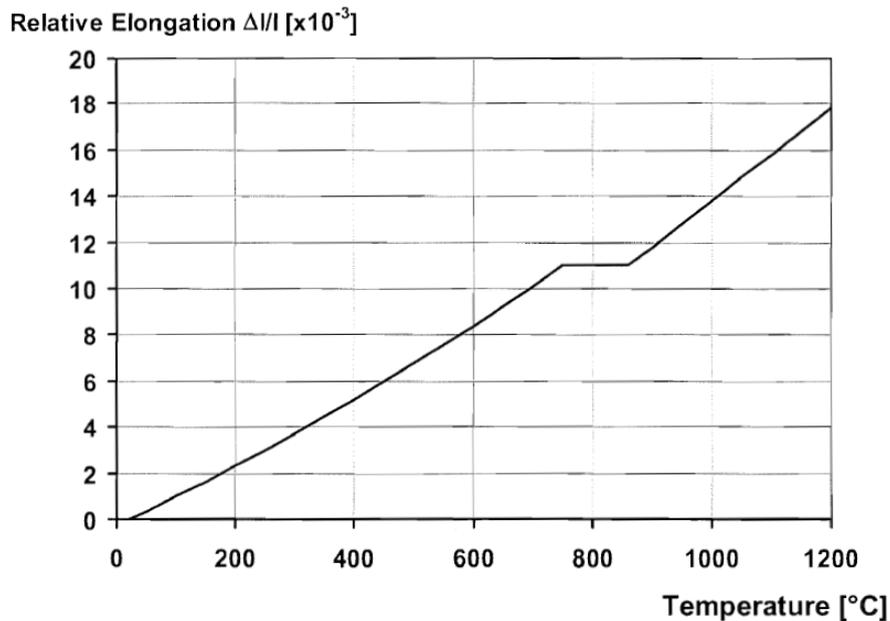


Figura 5: Dilatazione termica dell'acciaio in funzione della temperatura EN 1993-1-2:2005

Calore specifico

Per calore specifico si intende la quantità di energia che la massa deve assorbire per subire un incremento di 1°C di temperatura (espresso in J/kgK). La norma BS EN 1993-1-2:2005, permette di valutare il calore specifico nel seguente modo:

- per $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 600^{\circ}\text{C}$:
$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3$$
- per $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 735^{\circ}\text{C}$:
$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 \cdot \theta_a}$$
- per $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 900^{\circ}\text{C}$:
$$c_a = 650$$

In Figura 6 si riporta il grafico del calore specifico fornito dall'Eurocodice per l'acciaio. Si può notare la presenza del picco a 735°C dovuto alla transizione di fase: il materiale

modifica la struttura microcristallina passando da una fase ferritica a una fase austenitica. Durante la fase di transizione l'acciaio assorbe l'energia termica senza innalzare la propria temperatura fino al completamento della trasformazione con conseguente aumento del calore specifico. Tra 750 °C e 860 °C si ha un plateau che tiene conto degli effetti legati alla transizione di fase che caratterizza l'acciaio da carpenteria.

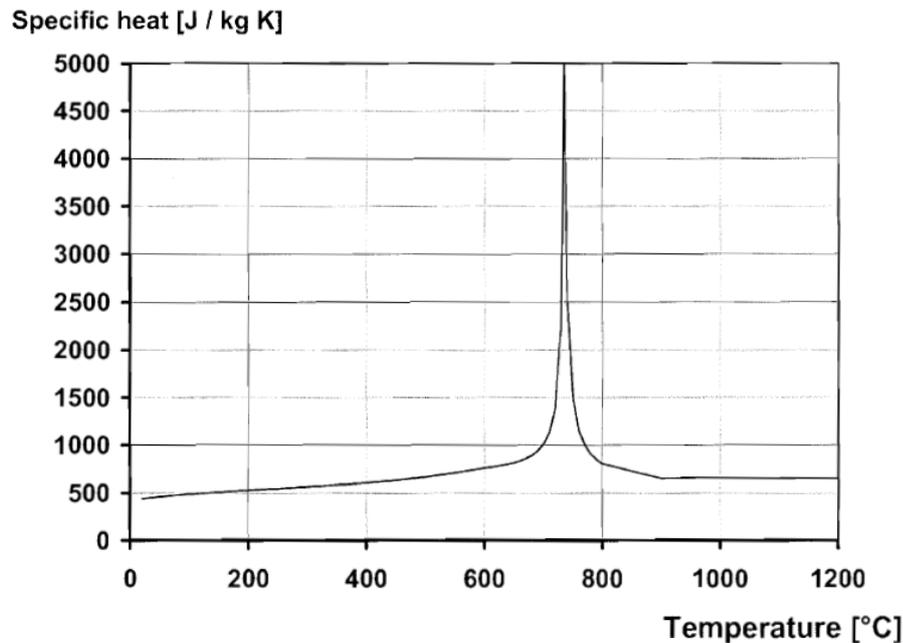


Figura 6: Calore specifico dell'acciaio in funzione della temperatura EN 1993-1-2.

Per valutazioni approssimate è lecito assumere il calore specifico costante e in particolare pari a 465 J/kg°C per un acciaio al carbonio e pari a 500 J/kg°C per un acciaio inossidabile.

Conducibilità termica

La conducibilità termica dell'acciaio decresce all'aumentare della temperatura. Il valore parte da 54 W/mK e decresce fino alla temperatura di 800°C, dopodiché rimane costante al valore di 27.3 W/mK. La norma [9], permette di determinare l'andamento della conducibilità termica all'aumentare della temperatura come segue, valori espressi in W/mK:

- per $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 800^{\circ}\text{C}$:
$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a$$
- per $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 735^{\circ}\text{C}$:
$$\lambda_a = 27,3$$

In Figura 7 si riporta l'andamento della conducibilità termica dell'acciaio in funzione della temperatura.

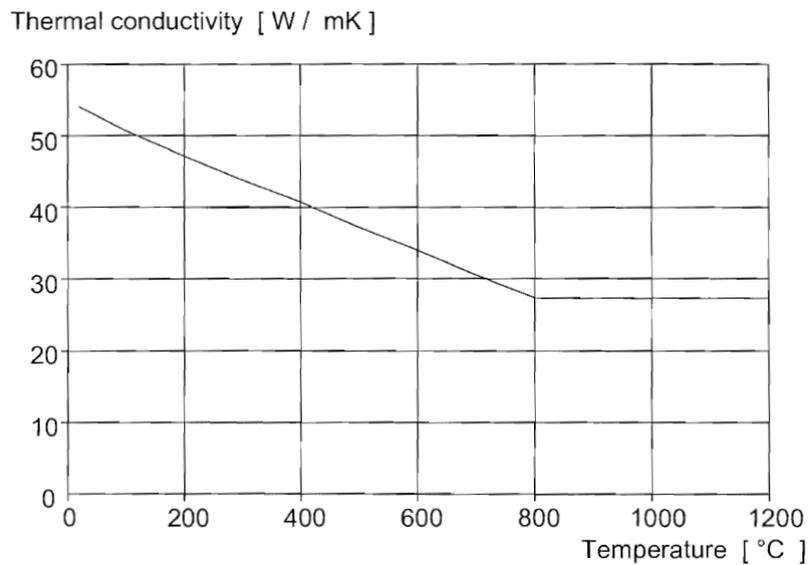


Figura 7: Conducibilità termica dell'acciaio in funzione della temperatura EN 1993-1-3:2005.

2.3.2. Proprietà meccaniche

L'acciaio presenta una densità di massa indipendente con la temperatura, tale valore è pari a 7850 kg/m^3 .

Per valori compresi nell'intervallo tra 2 e 50 K/min, le proprietà di tensione e deformazione dell'acciaio al carbone a elevate temperature segue l'andamento tensione-deformazione riportato in Figura 8.

Il modello costitutivo [9] può essere considerato per valutare la resistenza a tensione, compressione, momento flettente e tagli degli elementi strutturali in acciaio al carbone ad alta temperatura.

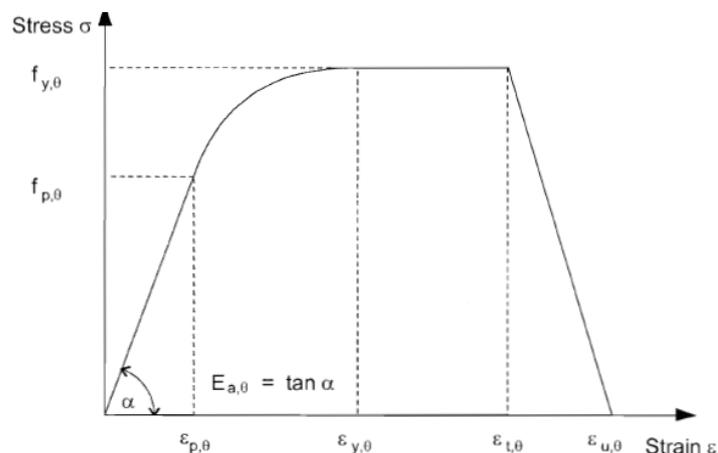


Figura 8: Modello costitutivo dell'acciaio ad alte temperature EN 1993-1-2:2005.

Dove:

- θ è la temperatura del materiale;
- $f_{y,\theta}$ è la tensione di snervamento;
- $f_{p,\theta}$ è il limite di proporzionalità;
- $E_{a,\theta}$ è il modulo elastico;
- $\varepsilon_{p,\theta}$ è la deformazione in corrispondenza del limite di proporzionalità;
- $\varepsilon_{y,\theta}$ è la deformazione di snervamento;
- $\varepsilon_{t,\theta}$ è la deformazione ultima di snervamento;
- $\varepsilon_{u,\theta}$ è la deformazione ultima.

Le alte temperature provoca il degrado dei parametri dei materiali come la tensione di snervamento, il limite di proporzionalità e il modulo elastico del materiale.

In sono riportate l'andamento la tensione e modulo tangente elastico per ciascun tratto del legame costitutivo.

Strain range	Stress σ	Tangent modulus
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,0}$	$\varepsilon E_{a,0}$	$E_{a,0}$
$\varepsilon_{p,0} < \varepsilon < \varepsilon_{y,0}$	$f_{p,0} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon)^2]^{0.5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon)}{a [a^2 - (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon)^2]^{0.5}}$
$\varepsilon_{y,0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,0}$	$f_{y,0}$	0
$\varepsilon_{t,0} < \varepsilon < \varepsilon_{u,0}$	$f_{y,0} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,0}) / (\varepsilon_{u,0} - \varepsilon_{t,0})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,0}$	0,00	-
Parameters	$\varepsilon_{p,0} = f_{p,0} / E_{a,0}$ $\varepsilon_{y,0} = 0,02$	$\varepsilon_{t,0} = 0,15$ $\varepsilon_{u,0} = 0,20$
Functions	$a^2 = (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0} + c / E_{a,0})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0}) E_{a,0} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,0} - f_{p,0})^2}{(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0}) E_{a,0} - 2(f_{y,0} - f_{p,0})}$	

Figura 9: valori di resistenza e modulo elastico per ogni range di deformazione EN 1993-1-2:2005

Nel [9] sono forniti i fattori di riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio sopradescritte. I fattori di riduzione riportano un rapporto della singola prestazione misurata a caldo e a freddo.

Tabella 6: fattori di riduzione dell'acciaio

Descrizione	Formula
Resistenza a snervamento effettivo, relativa alla resistenza di snervamento misurata a 20°C	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$
Limite di proporzione, relativa alla resistenza allo snervamento misurata a 20°C	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$
Variatione del modulo elastico, relativa al modulo elastico a 20°C	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$

Dove:

- $f_{y,\theta}$ – resistenza a snervamento corrispondente alla temperatura θ ;
- f_y – resistenza a snervamento corrispondente alla temperatura di 20°C;
- $f_{p,\theta}$ – resistenza di proporzionalità corrispondente alla temperatura θ ;
- $E_{a,\theta}$ – modulo elastico corrispondente alla temperatura θ ;
- E_a – modulo elastico corrispondente alla temperatura di 20°C.

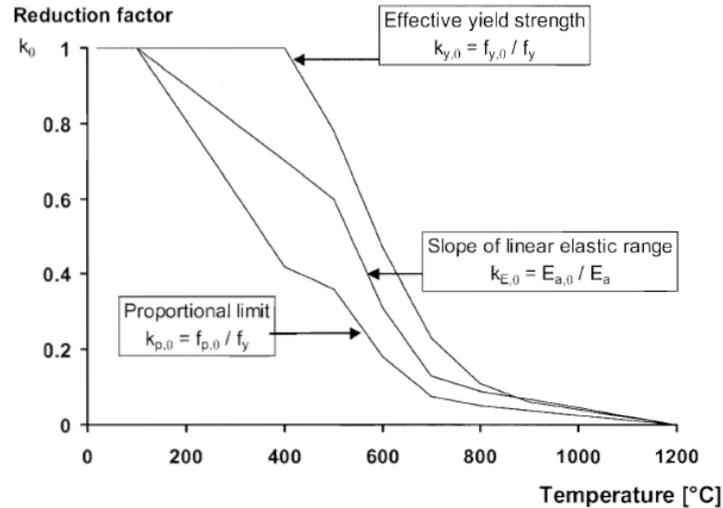


Figura 10: Grafico dei fattori di riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio alle temperature elevate

Steel Temperature θ_s	Reduction factors at temperature θ_s relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength $k_{y,0} = f_{y,0} / f_y$	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit $k_{p,0} = f_{p,0} / f_y$	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,0} = E_{a,0} / E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

Figura 11: Fattori di riduzione delle caratteristiche meccaniche ad elevate temperature

L'acciaio non subisce nessuna modifica nelle proprietà meccaniche fino a 100°C. Dopo inizia il decadimento del limite di proporzionalità e del modulo elastico. Alla temperatura di 400°C inizia il decadimento della tensione di snervamento. A tali temperature il limite di proporzionalità è sceso a 40% del valore a freddo e il modulo elastico del 70% del valore a freddo.

A 600°C l'acciaio perde approssimativamente il 50% della resistenza di snervamento e il 70% della sua rigidità e infine le proprietà meccaniche possono essere considerate completamente annullate (circa il 10% di quelle a freddo) per temperature prossime a 700°C.

In genere, anche a carico costante, il degrado della rigidità può portare, nei profili snelli, a fenomeni di instabilità anticipata (rispetto alle condizioni a freddo), mentre il degrado delle proprietà della resistenza può portare alla formazione anticipata delle cerniere plastiche negli elementi strutturali, le quali a loro volta possono condurre a formazioni di cinematismi di collasso della struttura.

Pertanto, se si considera la curva nominale d'incendio ISO 837 raggiunge la temperatura di 700°C in un tempo di circa 700s, pertanto, una struttura in acciaio esposta senza protezioni all'incendio, può raggiungere il collasso anche nel tempo di pochi minuti.

3. VERIFICA STRUTTURE IN ACCIAIO SOGGETTE ALL'AZIONE DEL FUOCO

La resistenza al fuoco è la capacità di una costruzione, di parte di essa o di un elemento costruttivo di mantenere, per un tempo prefissato, la capacità portante, l'isolamento termico e la tenuta alle fiamme, ai fumi e ai gas caldi della combustione nonché tutte le altre prestazioni richieste.

La verifica di resistenza al fuoco può essere condotta nel dominio:

- **Dominio del tempo ($t_{f,t,d} \geq t_{f,t,richiesto}$):** in funzione al livello di sicurezza della struttura in esame bisogna verificare che la struttura mantenga la sua capacità portante nel tempo o che la struttura non collassi per un determinato tempo richiesto.
- **Dominio della temperatura ($\Theta_{d,t} \geq \Theta_{cr,d}$):** la verifica viene condotta confrontando la massima temperatura raggiunta nella struttura durante l'esposizione al fuoco con la temperatura critica dell'acciaio in esame. La temperatura critica dell'acciaio è quella temperatura in cui si perde la capacità portante dell'elemento
- **Dominio della resistenza ($R_{f,t,d,t} \geq E_{f,t,d,t}$):** la capacità portante è confrontata con le sollecitazioni strutturali soggetta oltre ai carichi strutturali anche all'azione termica.

L'elemento strutturale in esame può essere:

- Non protetto;
- Protetto da materiale isolante;
- Protetto da schermo termico;

Altri esempi di protezione al fuoco sono riempimento ad acqua e protezione parziale per contatto con altri elementi come muri e solai.

Per determinare la resistenza strutturale della struttura in acciaio i seguenti metodi sono permessi dalla norma¹⁰:

- Modello di calcolo semplificato;
- Modello di calcolo avanzato;
- Test a scala reale.

L'utilizzo del modello di calcolo avanzato in un Paese si può trovare nel suo National Annex.

¹⁰ BS EN 1993-1-2:2005- capitolo 4.1.

3.1. Modello di calcolo semplificato

Il modello di calcolo semplificato rappresenta un modello di design per singoli elementi strutturali, basati su ipotesi di tipo conservative mediante l'utilizzo della norma [9].

3.1.1. Generale

La verifica strutturale del richiede che la capacità portante del singolo elemento strutturale nel tempo deve essere **sempre maggiore** della sollecitazione agente:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

Dove:

- $E_{fi,d}$: è l'azione strutturale per effetto dell'incendio, in accordo alla norma [9];
- $R_{fi,d,t}$: è la capacità portante dell'elemento strutturale, corrispondente all'azione dell'incendio, valutato all'istante t.

Il valore della capacità portante $R_{fi,d,t}$ valutato all'istante generico t, di solito valutato sotto l'ipotesi di distribuzione uniforme della temperatura nella sezione, deve essere determinato modificando il valore della capacità portante a freddo della struttura [11].

La capacità portante diventa, in funzione della sollecitazione sulla struttura, momento flettente resistente a caldo $M_{fi,d,t}$, forza di trazione resistente a caldo $N_{fi,d,t}$, taglio resistente a caldo $V_{fi,d,t}$ e così via, valutati separatamente o combinati tra loro.

Se la sezione presenta una distribuzione di temperatura non uniforme, si procede sempre con la modifica della capacità portante valutato a freddo in funzione della distribuzione di temperatura nella sezione.

3.1.2. Classificazione della sezione in acciaio

La classificazione della sezione si effettua in funzione della loro capacità di deformarsi in campo plastico, ovvero capire se l'instabilità locale (Buckling) precede o meno la possibilità di creare cerniere plastiche.

Le sezioni trasversali degli elementi strutturali si classifica in funzione della loro capacità di rotazione C_θ [12] definita come:

$$C_\theta = \frac{\theta_r}{\theta_y} - 1$$

Dove:

- θ_r è la rotazione corrispondente al raggiungimento della deformazione ultima;

¹¹ BS EN 1993-1-1, capitolo 4.2.3.

¹² NTC 17/01/2018-capitolo 4.2.3.1.

- θ_y è la rotazione corrispondente al raggiungimento della deformazione di snervamento;

È possibile distinguere 4 classi di sezioni:

- **Classe 1** (sezioni plastiche o duttili): Sezione in grado di sviluppare completamente una cerniera plastica e avente capacità rotazionale richiesta per l'analisi plastica, $C_\theta \geq 3$.
- **Classe 2** (sezioni compatte): sezioni trasversali in grado di sviluppare completamente il proprio momento resistente plastico, ma con rotazione limitata, $C_\theta \geq 1.5$
- **Classe 3** (sezioni semi-compatte): sezioni trasversali nelle quali le fibre compresse possono raggiungere la tensione di snervamento, ma l'instabilità locale impedisce lo sviluppo del momento resistente plastico.
- **Classe 4** (sezioni snelle): sezioni trasversali nelle quali è necessario mettere in conto gli effetti dell'instabilità locale nel determinare il loro momento resistente o la loro resistenza a compressione; tal caso nel calcolo della resistenza la sezione geometrica effettiva può sostituirsi con una sezione efficace.

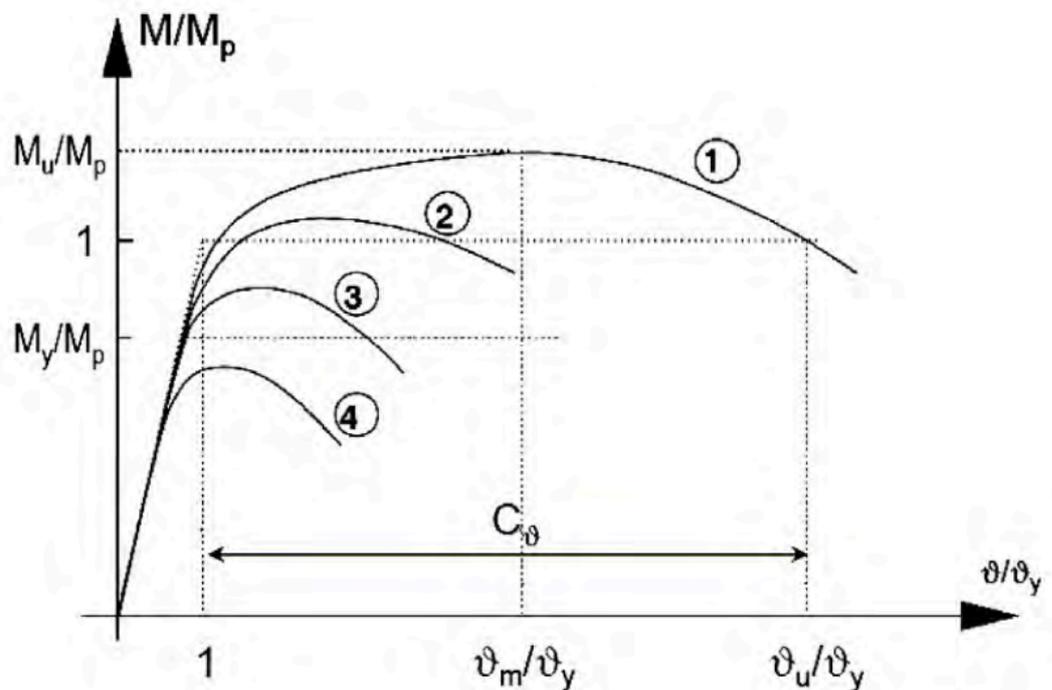


Figura 12: capacità di rotazione plastica della sezione

La classe della trave è determinata come nella classificazione a freddo tenendo in conto del parametro λ ridotto di un fattore pari a 0.85.

$$\varepsilon = 0.85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Dove:

- f_y è la resistenza di snervamento a freddo (valutato per $T=20^\circ\text{C}$)

Il fattore di riduzione 0.85 considera l'influenza dell'incremento di temperatura nella sezione.

Pertanto, per valutare la classe della sezione (vedi [13]), bisogna conoscere:

- Della classe di resistenza del materiale;
- Rapporto dimensionale tra larghezza e spessore delle parti componenti della sezione;
- Dello stato tensionale.

3.1.3. Resistenza strutturale a caldo

3.1.3.1. Resistenza a trazione a caldo

La resistenza a trazione a caldo $N_{fi,\theta,Rd}$ di un elemento strutturale soggetto a trazione, per una *distribuzione uniforme di temperatura* si determina:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- $k_{y,\theta}$: è il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento valutato alla temperatura;
- N_{Rd} : è la resistenza a trazione a freddo valutato a temperatura ambiente ($T=20^\circ\text{C}$);

La resistenza a trazione a caldo $N_{fi,\theta,Rd}$ di un elemento strutturale soggetto a trazione, per una *distribuzione non uniforme di temperatura* si determina:

$$N_{fi,\theta,Rd} = \sum_{i=1}^n k_{y,\theta,i} \cdot \frac{A_i \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- A_i : è l'area elementare della sezione trasversale soggetta alla temperatura θ ;
- $k_{y,\theta,i}$: è il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento valutato alla temperatura;
- θ_i : è la temperatura della area elementare A_i .

¹³ BS EB 1993-1-1:2005, capitolo 5.6, tabella 5.2.

La resistenza a trazione di un elemento soggetto a una distribuzione di temperatura non uniforme può essere preso cautelativamente il valore di resistenza a trazione dell'elemento con una distribuzione di temperatura uniforme soggetta alla temperatura $\theta_{a,max}$ raggiunta al tempo t.

3.1.3.2. Resistenza a compressione degli elementi di classe 1, classe 2 e classe 3

La resistenza a compressione o Buckling $N_{b,fi,t,Rd}$ valutata all'istante t, di un elemento soggetto a compressione per sezioni di classe 1, classe 2 e classe 3 per una distribuzione uniforme di temperatura θ_a , si determina:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- χ_{fi} : è il coefficiente riduttivo della resistenza flessionale a buckling valutato a caldo;
- $\gamma_{M,fi}$: è il coefficiente parziale di sicurezza del materiale.

Il valore di χ_{fi} è il valore più basso di $\chi_{x,fi}$ e $\chi_{y,fi}$ lungo i due assi principali di inerzia della sezione, valutato come:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 + \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

Con:

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2]$$

Il valore del coefficiente di imperfezione a caldo si può determinare

$$\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Il valore della snellezza non dimensionale alla temperatura θ_a , è dato da:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5}$$

Il valore della snellezza a freddo si determina:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

Formula valida per la classe 1, classe 2 e classe 3. Per la classe 4 l'area della sezione si riduce all'area effettiva ($A = A_{eff}$)

Il carico critico euleriano si calcola con la seguente formula:

$$N_{cr} = \min\{N_{cr,x}; N_{cr,y}\} = \min\left\{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{l_{fi,x}^2}; \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{l_{fi,y}^2}\right\}$$

La lunghezza libera di inflessione (lunghezza di buckling) di una colonna soggetta all'azione di incendio si determina come nel calcolo a freddo. Comunque, in un telaio controventato, la lunghezza libera di inflessione di una colonna può essere valutata supponendo che la colonna sia fissata in direzione dei nodi continui o semi-continui. Questi nodi sono i collegamenti alle colonne nei comparti antincendio direttamente sopra e sotto la colonna in questione.

Nel caso del telaio controventato dove ogni piano rappresenta un compartimento con sufficiente resistenza al fuoco, in un intermedio piano la lunghezza libera di inflessione di una colonna continua è pari a $l_{fi} = 0.5 \cdot L$ e nell'ultimo piano la lunghezza libera di inflessione per la colonna continua è pari a $l_{fi} = 0.7 \cdot L$, dove L è la lunghezza della colonna in ciascun piano.

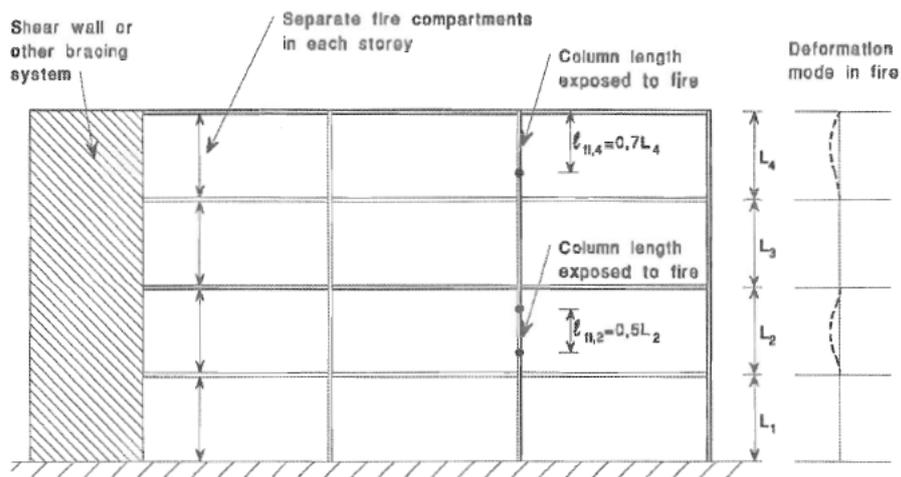


Figura 13: lunghezza libera di inflessione di colonne nei telai controventati

Nel caso di incendio nominale la resistenza $N_{b,fi,t,Rd}$ valutata all'istante t di un membro soggetto a compressione e ad una distribuzione di temperatura non uniforme, si può utilizzare il valore di resistenza a compressione valutato con un andamento uniforme di temperatura sulla struttura $\theta_{a,max}$ raggiunta all'istante t.

3.1.3.3. Resistenza a flessione per travi di classe 1 e classe 2

Il momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ per sezioni di classe 1 e classe 2 soggetta ad una temperatura uniforme θ_a si determina con la seguente formulazione:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \cdot M_{Rd}$$

Dove:

- M_{Rd} : è il momento plastico resistente della sezione $M_{pl,Rd}$ determinato a freddo ($T=20^{\circ}\text{C}$) oppure al valore di momento resistente a freddo ridotto per effetto del taglio se il valore del taglio agente supera 50% quello resistente, in accordo alla norma [14].
- $k_{y,\theta}$: è il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento a caldo.

Il momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ per sezioni di classe 1 e classe 2 soggetta ad una distribuzione non uniforme di temperatura lungo la sezione si determina con la seguente formulazione:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot z_i \cdot k_{y,\theta i} \cdot \frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- z_i : è la distanza dall'asse neutro plastico dal centro dell'elemento infinitesimo di area A_i ;
- $f_{y,i}$: è la tensione di snervamento dell'elemento infinitesimo di area A_i considerato come positivo nella zona dell'asse neutro plastico in compressione e negativo nella zona a trazione.

In alternativa, il momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ per sezioni di classe 1 e classe 2 soggetta ad una distribuzione non uniforme di temperatura lungo la sezione si determina anche con la seguente formulazione:

$$M_{fi,\theta,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{(k_1 \cdot k_2)}$$

$$M_{fi,\theta,Rd} \leq M_{Rd}$$

Dove:

- $M_{fi,\theta,Rd}$ è il momento resistente per sezioni di classe 1 e classe 2 soggetta ad una temperatura uniforme θ_a nel tempo t nella sezione, non influenzata termicamente dai vincoli esterni;
- k_1 : è un fattore che tiene conto della distribuzione non uniforme della temperatura nella sezione;
- k_2 : è un fattore che tiene conto della distribuzione non uniforme della temperatura lungo l'asse della trave.

¹⁴ BS EN 1993-1-1:2005. Capitolo 6.2.5.

Per maggiore informazione dei coefficienti (k_1, k_2) si rimanda alla norma [15].

Il valore di resistenza flessio-torsionale, meglio conosciuta nella lingua anglosassone lateral torsional buckling (LTB), $M_{b,fi,t,Rd}$ al tempo t di una sezione non vincolata lateralmente di classe 1 o classe 2 si determina con la seguente relazione:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W_{pl,fi} \cdot k_{y,\theta,com} \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- $\chi_{LT,fi}$: è il coefficiente riduttivo della resistenza flessio-torsionale sotto l'azione dell'incendio;
- $k_{y,\theta,com}$: è il coefficiente riduttivo della tensione di snervamento valutato alla temperatura della flangia compressa con la temperatura $\theta_{a,com}$ raggiunta al tempo t .

Nota: In modo conservativo, la temperatura $\theta_{a,com}$ si può assumere uguale alla temperatura uniforme θ_a .

Il valore di $\chi_{LT,fi}$ è valutato con la seguente relazione:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\phi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2}}$$

Con:

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2]$$

Il valore del coefficiente di imperfezione a caldo si può determinare

$$\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Il valore della snellezza non dimensionale alla temperatura θ_a , è dato da:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \left[\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right]^{0.5}$$

¹⁵ BS EN 1993-1-2:2005-capitolo 4.2.3.3. punto (7) e punto (8).

3.1.3.4. Resistenza a taglio sezione di classe 1 e classe 2

La resistenza a taglio $V_{fi,t,Rd}$ valutato al tempo t per sezioni di classe 1 e classe 2 si può determinare con la seguente relazione:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} \cdot V_{Rd} \cdot \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right]$$

Dove:

- V_{Rd} è il taglio resistente della sezione valutato a temperatura ambiente, in accordo alla norma [16];
- θ_{web} è la temperatura dell'anima della sezione;
- $k_{y,\theta,web}$ è il coefficiente riduttivo della tensione di snervamento dell'anima soggetta alla temperatura θ_{web} ;

3.1.3.5. Resistenza a flessione per sezioni di classe 3

Il momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ al tempo t di una sezione di classe 3 soggetta ad una temperatura uniforme sulla sezione si può determinare:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot M_{Rd} \cdot \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right]$$

Dove:

- M_{Rd} : è il momento resistente al limite elastico della sezione $M_{el,Rd}$ valutato a temperatura ambiente, se il taglio agente supera il 50% del taglio resistente allora bisogna considerare anche il fattore di riduzione della resistenza per effetto del taglio, in accordo alla norma [16].

Il momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ al tempo t di una sezione di classe 3 soggetta ad una distribuzione non uniforme della temperatura sulla sezione si può determinare:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta,max} \cdot M_{Rd} \cdot \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right] / (k_1 \cdot k_2)$$

Dove:

- M_{Rd} : M_{Rd} : è il momento resistente al limite elastico della sezione $M_{el,Rd}$ valutato a temperatura ambiente, se il taglio agente supera il 50% del taglio resistente allora bisogna considerare anche il fattore di riduzione della resistenza per effetto del taglio, in accordo alla norma [16].
- $k_{y,\theta,max}$: coefficiente di riduzione a caldo della resistenza a snervamento soggetta alla temperatura massima θ_{max} ;

¹⁶ BS EN 1993-1-1;

3.1.3.6. Resistenza flesso-torsionale sezione di classe 3

Il valore di resistenza flesso-torsionale $M_{b,fi,t,Rd}$ al tempo t di una sezione non vincolata lateralmente di classe 3 si determina con la seguente relazione:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W_{el,fi} \cdot k_{y,\theta,com} \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- $\chi_{LT,fi}$: è il coefficiente riduttivo della resistenza flesso-torsionale sotto l'azione dell'incendio;
- $k_{y,\theta,com}$: è il coefficiente riduttivo della tensione di snervamento valutato alla temperatura della flangia compressa con la temperatura $\theta_{a,com}$ raggiunta al tempo t.

Nota: In modo conservativo, la temperatura $\theta_{a,com}$ si può assumere uguale alla temperatura uniforme θ_a .

3.1.3.7. Resistenza a taglio sezione di classe 3

La resistenza a taglio $V_{fi,t,Rd}$ valutato al tempo t per una sezione di classe 3 si può determinare con la seguente relazione:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} \cdot V_{Rd} \cdot \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right]$$

Dove:

- V_{Rd} è il taglio resistente della sezione valutato a temperatura ambiente, in accordo alla norma [16];
- θ_{web} è la temperatura dell'anima della sezione;
- $k_{y,\theta,web}$ è il coefficiente riduttivo della tensione di snervamento dell'anima soggetta alla temperatura θ_{web} ;

3.1.3.8. Sezioni di classe 1,2 o 3 soggetta ad azione combinata di flessione e compressione

La resistenza di buckling $R_{fi,t,Rd}$ al tempo t di un elemento strutturale soggetto ad azione combinata di momento flettente e forza di compressione per sezioni di classe 1 e classe 2 si determina con le seguenti formulazioni:

$$\frac{N_{fi,t,Rd}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{fi,Rd}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,y} \cdot W_{LT,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{LT,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

La resistenza di buckling $R_{fi,t,Rd}$ al tempo t di un elemento strutturale soggetto ad azione combinata di momento flettente e forza di compressione per sezioni di classe 3 si determina con le seguenti formulazioni:

$$\frac{N_{fi,Rd}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{el,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{fi,Rd}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,y} \cdot W_{el,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

Dove:

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

Con:

$$\mu_{LT} = 0.15 \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15 \leq 0.9$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

Per l'asse forte

$$\mu_y = (2\beta_{M,y} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} + 0.29 \leq 0.8$$

$$\bar{\lambda}_{y,20^\circ C} \leq 1.$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A1 \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

Per l'asse debole

$$\mu_z = (1.2\beta_{M,z} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0.71 \cdot \beta_{M,z} - 0.29 \leq 0.8$$

Nota: per una variazione uniforme del momento flettente il fattore β_M si può determinare come riportato nella Figura 14.

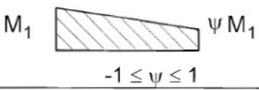
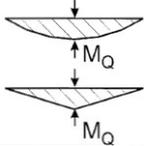
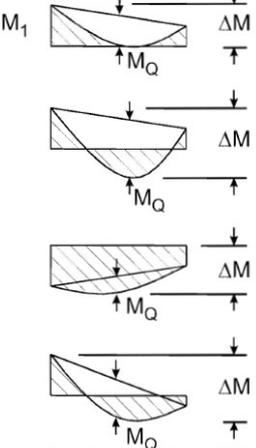
Moment diagram	Equivalent uniform moment factor β_M
<p>End moments</p>  <p>M_1 ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \psi$
<p>Moments due to in-plane lateral loads</p>  <p>M_Q M_Q</p>	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
<p>Moments due to in-plane lateral loads plus end moments</p>  <p>M_1 M_Q ΔM M_Q ΔM M_Q ΔM M_Q ΔM</p>	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q = \max M $ due to lateral load only $\Delta M \begin{cases} \max M & \text{for moment diagram without change of sign} \\ \max M + \min M & \text{for moment diagram with change of sign} \end{cases}$

Figura 14: fattore di momento flettente equivalente

3.1.3.9. Elementi strutturali di classe 4

Per elementi strutturali di classe 4 oltre che per gli elementi soggetti a tensione si può assumere che la verifica a flessione e compressione combinato sia verificato se al tempo t generico, la temperatura della sezione è inferiore alla temperatura critica:

$$\theta_a \leq \theta_{crit}$$

Nota: la norma BS EN 1993-1-2:2005 raccomanda un valore di $\theta_{crit} = 350^\circ\text{C}$.

3.1.4. Temperatura critica

Un metodo alternativo per valutare la resistenza della struttura è definito nel dominio delle temperature.

Ad esclusione di quando si considera il criterio di deformazione o quando bisogna tenere in conto del fenomeno di instabilità locale, la temperatura critica dell'acciaio al carbonio, in accordo alla norma [17], al tempo t generico per una distribuzione uniforme della temperatura nella sezione si può determinare per ogni grado di utilizzo μ_0 al tempo $t=0$ utilizzando:

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

Dove μ_0 deve essere inferiore di 0.013.

Per μ_0 compresi tra 0.22 e 0.80 sono riportati in Figura 15.

μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

Figura 15: temperatura critica al variare del fattore di utilizzo

Per elementi strutturali di classe 1, classe 2 e classe 3 e per tutti i membri soggetti a trazione, il fattore di utilizzo μ_0 , al tempo $t=0$ si ottiene:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Dove:

- $R_{fi,d,0}$: è il valore della resistenza dell'elemento in funzione all'azione sollecitante;
- $E_{fi,d}$: azione sollecitante.

¹⁷ Il metodo è applicabile all'acciaio S235, S275, S355, S420 e S460 del EN 10025 e tutte le classi della norma EN 10210 e EN 10219.

Alternativamente per elementi soggetti a trazione, e per travi dove l'azione flessione-torsione non è un probabile scenario di rottura, μ_0 si può determinare conservativamente dalla seguente relazione:

$$\mu_0 = \eta_{fi} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}}$$

Dove:

- η_{fi} : è il coefficiente riduttivo della combinazione di carico.

3.1.5. Sviluppo della temperatura negli elementi non protetti

Per una distribuzione uniforme della temperatura nella sezione, l'incremento di temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ in un elemento strutturale non protetto durante un intervallo di tempo Δt si può determinare con la seguente relazione:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,a} \Delta t$$

Dove:

- k_{sh} : è il coefficiente che tiene conto del "effetto ombra";
- $\frac{A_m}{V}$: è il fattore di sezione per una sezione di acciaio non protetta;
- A_m : superficie esposta dell'elemento per unità di lunghezza;
- V : volume dell'elemento per unità di lunghezza;
- c_a : calore specifico dell'acciaio;
- $\dot{h}_{net,a}$: flusso di calore netto;
- Δt : intervallo di tempo;
- ρ_a : densità dell'elemento in acciaio;

Per sezioni ad I sotto l'azione degli incendi nominali, il coefficiente che tiene conto dell'effetto ombra si determina con la seguente formulazione:

$$k_{sh} = 0.9 \frac{\left[\frac{A_m}{V} \right]_b}{\left[\frac{A_m}{V} \right]}$$

Dove:

- $\left[\frac{A_m}{V} \right]_b$: è il fattore di sezione dell'area del box (riportato in colore nero tratteggiato in Figura 16)

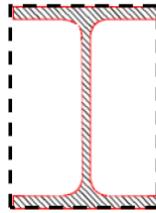


Figura 16: sezione trave in acciaio – fattore di sezione

In altri casi, il valore del coefficiente che tiene conto dell'effetto ombra si determina con la seguente relazione:

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]}$$

Per sezione con una sezione convessa (rettangolare, circolare) soggetta completamente al fuoco, il fattore ombra non gioca un ruolo importante e per questo motivo si assume pari a 1, permettendo di ottenere risultati più conservativi.

Il valore del flusso bisogna determinarlo mediante la norma [18] utilizzando un valore di emissività $\varepsilon_f=1$.

Il valore di Δt bisogna considerarlo non superiore a 5s.

Il fattore di sezione non si considera se la sezione presenta un valore inferiore di $10m^{-1}$

¹⁸ BS EN 1991-1-2.

3.1.6. Flusso netto per incendi nominali

Il flusso netto entrante nell'acciaio è dato come somma di due contributi, secondo la norma [19]:

- flusso netto convettivo: in funzione della temperatura e moto dei gas nell'intorno dell'elemento strutturale;
- flusso netto radiativo: dipende dal fattore di configurazione tra le superfici emittente e ricevente.

Il flusso totale si determina con la seguente relazione:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

Dove:

- $\dot{h}_{net,c}$ è il flusso netto convettivo (W/m²);
- $\dot{h}_{net,r}$ è il flusso netto radiativo (W/m²).

Il flusso netto convettivo si determina con la seguente formulazione:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m)$$

Dove:

- α_c è il coefficiente di trasferimento del calore per convezione (W/m²K). Il valore raccomandato dalla presente norma per modelli di calcolo avanzati pari a 35 W/m²K.
- θ_g è la temperatura dei gas in prossimità dell'elemento strutturale soggetto all'azione di incendio (°C);
- θ_m è la temperatura superficiale dell'elemento strutturale (°C);

Il flusso netto radiativo si determina con la seguente formulazione:

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

Dove:

- ϕ è il fattore di configurazione;
- ε_m è l'emissività dell'elemento. La presente norma raccomanda un valore pari a 0.8;
- ε_f è l'emissività del fuoco. La presente norma raccomanda un valore pari a 1;
- σ è la costante di Stephan Boltzmann (5,65 x 10⁻⁸ W/m²K⁴);
- θ_r è la temperatura effettiva dell'ambiente [°C];
- θ_m è la temperatura superficiale dell'elemento strutturale [°C]

¹⁹ EN 1991-1-2:2002-Section 3 Thermal action for temperature analysis

3.2. Modello di calcolo avanzato

Il modello di calcolo avanzato prevede un'analisi più realistico della struttura soggetta all'azione di incendio. Il modello si basa sul comportamento fisico teorico della struttura soggetta all'azione dell'incendio in modo da avere soluzioni approssimate al comportamento reale della struttura.

Il modello di calcolo avanzato include due modelli di calcolo per determinare:

- La distribuzione della temperatura negli elementi strutturali (analisi termica);
- Il comportamento meccanico del complesso della struttura o parti di esso (analisi meccanica).

Si può utilizzare per qualsiasi curva di incendio, tenendo in conto il comportamento dei materiali alle alte temperature.

Il modello di calcolo avanzato si può utilizzare per ogni tipologia di sezione degli elementi strutturali.

3.2.1. Analisi termica e meccanica

Analisi termica

L'analisi termica mediante il calcolo avanzato deve tenere in conto modelli teorici di trasferimento del flusso termico.

La risposta termica deve tenere in conto:

- L'azione termica dell'incendio determinato secondo la norma [9] o mediante software CFD;
- La variazione delle proprietà del materiale con la temperatura;

Gli effetti dell'esposizione termica non uniforme e del trasferimento di calore agli elementi strutturali adiacenti possono essere quando opportuno.

Il contenuto di umidità e della migrazione dell'umidità all'interno del materiale di protezione antincendio può non essere considerato conservativamente.

Analisi meccanica

L'analisi meccanica mediante il calcolo avanzato deve tenere in conto regole e principi teorici del comportamento strutturale, tenendo in conto la variazione delle proprietà meccaniche con la temperatura.

Gli effetti di variazione della temperatura introducono stati di tensione e deformazione che bisogna tenere in conto nel calcolo strutturale.

Il modello meccanico deve tenere in conto:

- L'effetto combinato dell'azione meccanica, difetti geometrici e dell'azione termica;

- La variazione delle proprietà meccaniche con la temperatura dei materiali;
- Effetti geometrici di natura non lineare;
- Gli effetti non lineare delle proprietà dei materiali, includendo gli effetti sfavorevoli dei carichi sulla rigidità strutturale.

4. DESCRIZIONE DEI SOFTWARE DI CALCOLO

I software applicati ai fini dell'analisi strutturale sono i seguenti:

Tabella 7: software utilizzati

Tipologia	Software
Pre-processore	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pyrosim™ ▪ GmSAFIR ▪ cfd_fem_v0
Software di calcolo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ FDS ▪ SAFIR
Post-Processore	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Smokeview ▪ Results Pyrosim ▪ Diamond

4.1. Analisi termiche mediante software FDS

L'analisi termica è svolta mediante un software di calcolo agli elementi finiti Fire Dynamic Simulation (FDS).

4.1.1. Preprocessore Pyrosim™

Pyrosim è un'interfaccia grafica per il software di calcolo FDS che è stato integrato all'interno dell'interfaccia grafica, sviluppato da Thunderhead Engineering.

Il preprocessore Pyrosim è in grado di generare il file di input scritto nel formato leggibile per FDS. L'uso del preprocessore non è necessario per generare un file di input ma diventa tale quando si presentano geometrie e modelli di incendio più complessi. Infatti, il preprocessore permette:

- Importare file CAD per creare e gestire modelli complessi;
- Dispone di strumenti avanzati di disegno geometrico 2D e 3D;
- Elaborazione parallela integrata;
- Flessibilità nell'utilizzo dell'unità di misura;
- Organizzare la struttura del mesh di calcolo;
- Sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) integrati nella simulazione CFD;
- Importazione di modelli FDS esistenti;
- Post-elaborazione integrata.

4.1.2. FDS

Il software Fire Dynamic Simulator (FDS) è risolutore di un modello di fluidodinamica computazionale (CFD) del flusso dei fluidi causato dall'incendio, sviluppato dal NIST. Il software risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes per flussi caratterizzati di una bassa velocità ($Ma < 0.3$).

FDS è un programma scritto in formato Fortran, senza interfaccia grafica, in grado di leggere i parametri di input scritto in un file di testo e grazie alle equazioni governanti il fenomeno fisico restituisce e scrive i dati di output in un file di testo.

I file di output possono essere letti da un programma complementare Smokeview che ha un'interfaccia semplice, ma tuttavia, esistono altri programmi sviluppati da terze parti in grado di generare e leggere i file di testo contenente i parametri di input/output necessari a FDS.

4.1.3. Results Pyrosim

L'applicazione Results di Pyrosim permette di visualizzare i risultati durante e dopo la simulazione.

Results funziona come un video player con la possibilità di visualizzare in forma animata gli output per tutta la durata della simulazione con la possibilità di velocizzare o rallentarlo, stopparlo, trascinarlo ugualmente ad un video player.

Results permette inoltre di:

- Creare una section box;
- Modificare la barra dei colori;
- Aggiungere slice piani lungo i tre assi principali a partire dai plot3D;
- Creare delle isosuperfici;
- Vedere le slice 2D, boundaries, plot 3D.
- Visualizzazione solida, realistic o wireframe.

4.2. Analisi termo-meccaniche mediante software SAFIR™

L'analisi termo-meccaniche della struttura è eseguita mediante il software di calcolo SAFIR™.

4.2.1. Preprocessore GmSAFIR

GmSAFIR è un preprocessore grafico (vedi Figura 17) che permette di preparare i file input per il software di calcolo SAFIR, sviluppato in collaborazione tra l'università di Liège e Efectis France. GmSAFIR si basa sul generatore di mesh open source GMSH, scritto in formato Python che aggiunge ulteriori funzionalità a GMSH, permettendo di creare modelli strutturali e attribuire al modello proprietà termomeccanico.

GmSafir è suddiviso in:

- Geometria;
- Mesh;
- Risolutore.

Nella geometria è possibile creare *entità elementare* (punti, linea, rettangolo, archi, cerchi, superfici ecc...) e la possibilità di raggrupparli in *gruppi* per assegnare una specifica proprietà.

Nella Mesh è possibile creare il mesh (1D,2D o 3D) in funzione dell'analisi che si vuole svolgere e raffinarlo a piacimento.

Nel Risolutore è possibile definire la tipologia del problema che stiamo analizzando:

- Thermal 2D;
- Thermal 3D;
- Structural 2D;
- Structural 3D.

In funzione della tipologia di problema si può definire la temperatura iniziale, la precisione dell'analisi, il time step ecc.



Figura 17: interfaccia grafica GmSAFIR

4.2.2. SAFIR™

SAFIR è sviluppato dall'università di Liège dall'università di Johns Hopkins, è un programma scritto in Fortran che modella il comportamento delle strutture sottoposte a incendio basato sull'analisi agli elementi finiti (FEM) per valutare il comportamento bi- o tri-dimensionale. La struttura può essere modellata da una struttura tridimensionale di elementi lineare come travi e colonne, insieme ad elementi planari come solai e pareti. Inoltre, elementi volumetrici possono essere utilizzati per l'analisi di dettaglio come elementi di connessione.

File di Input

In Figura 18 si riporta il diagramma di flusso dell'analisi eseguito dal software SAFIR.

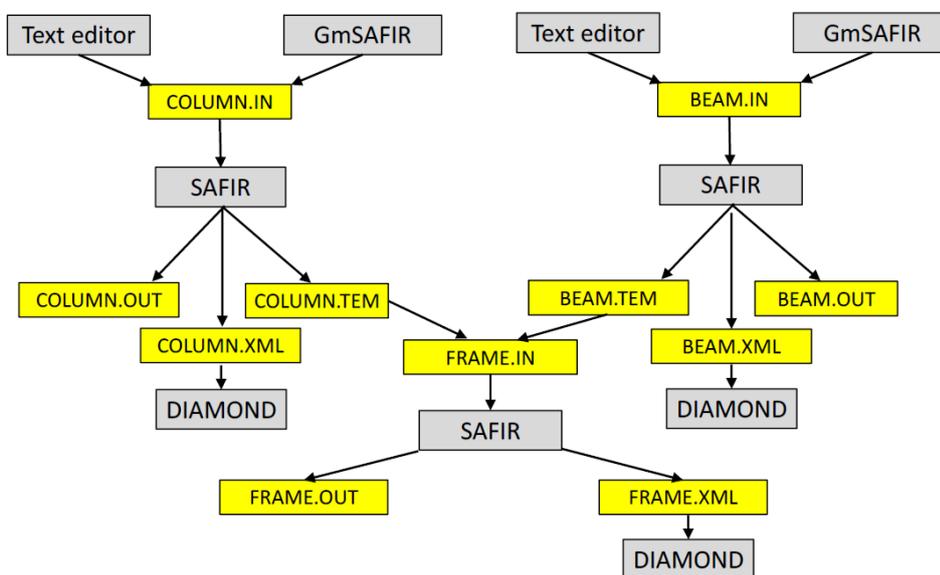


Figura 18: diagramma di flusso software SAFIR

Leggendo il diagramma di flusso, per ogni tipologia di sezione bisogna creare tanti file “file.IN”.

SAFIR esegue l'analisi termica e restituisce i seguenti file:

- “file.OUT” contenente i risultati dell'analisi;
- “file.TEM” contenente i risultati dell'analisi termica della sezione;
- “file.XML” che è leggibile dal software di post-processamento.

Una volta svolta l'analisi termica, prima di svolgere l'analisi strutturale, bisogna eseguire l'analisi torsionale e Safir restituisce un file con nome “file-t.TOR” contenente i risultati dell'analisi torsionale.

Infine, una volta generata la geometria è possibile eseguire l'analisi strutturale, restituendo i file come nel caso dell'analisi termica con estensione “.OUT e .XML” che riportano i risultati dell'analisi strutturale.

Analisi termica con SAFIR

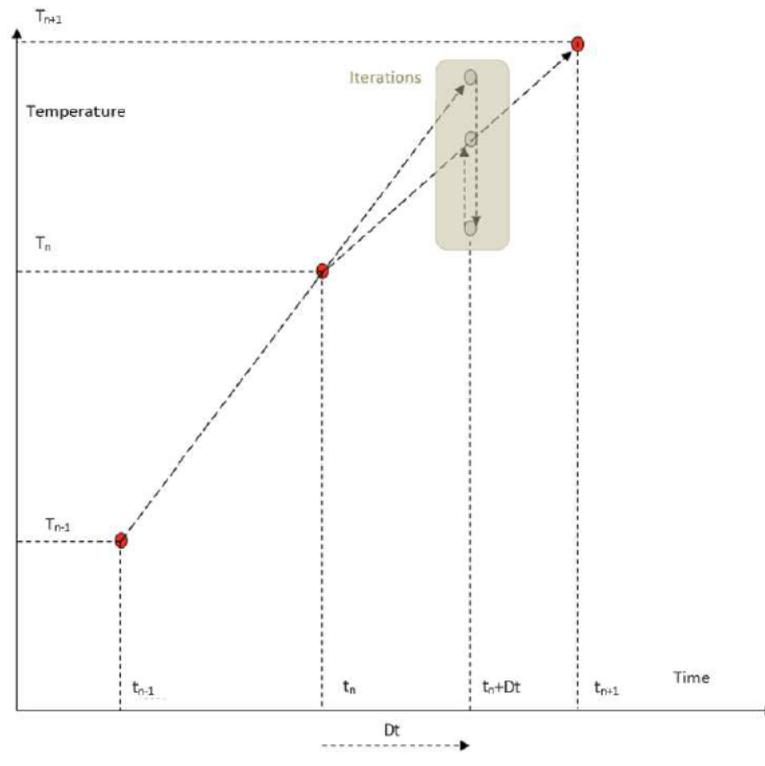


Figura 19: analisi termica con SAFIR – processo di iterazione della temperatura

SAFIR calcola la temperatura nella struttura a intervalli successivi in base alla scelta della discretizzazione temporale. Per ciascun intervallo di tempo che inizia con il tempo t_n :

- Estrapolando le temperature dai due intervalli di tempo precedenti, t_{n-1} e t_n , e approssima ad un determinato tempo $t_n + \Delta t$ compreso tra l'intervallo t_n e t_{n+1} . Le temperature in questa fase non sono in equilibrio.
- Raffina la prima approssimazione delle temperature a $t_n + \Delta t$ fino a quando l'equilibrio termico non viene equilibrato. Questo processo necessita diverse iterazioni per ripristinare l'equilibrio fino a un grado accettato di precisione.
- Estrapola le temperature a t_{n+1} a partire dai valori di t_n e $t_n + \Delta t$;
- Se l'intervallo di tempo è uno di quelli definiti prima della simulazione, la simulazione procede e SAFIR riporta tale valore di temperatura nei risultati.

In Figura 20 si riporta il diagramma di flusso dell'analisi termica descritta sopra.

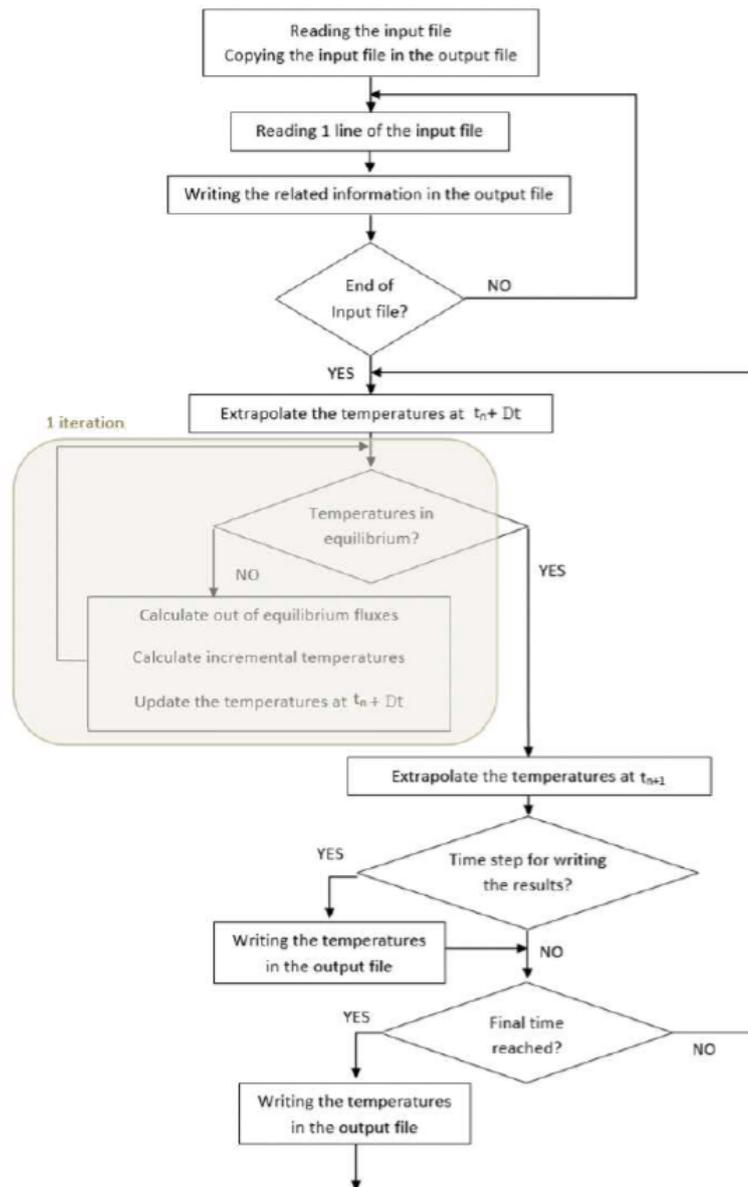


Figura 20: diagramma di flusso – analisi termica con SAFIR

L'equazione locale del trasferimento del calore in una sezione piana è determinata dalla seguente equazione differenziale alle derivate parziali:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Scritto in forma compatta:

$$k \nabla^2 T + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dove:

- k: conducibilità termica del materiale;
- T è la temperatura;
- Q: è la quantità di calore generata nel materiale per unità di volume;

- ρ : è la densità del materiale;
- c : capacità termica
- t : tempo.

In condizione di steady-state della temperatura nel tempo allora la formulazione si riduce e diventa:

$$k\nabla^2 T + Q = 0$$

Se non si genera più quantità di calore nel materiale per unità di volume, allora la formula si riduce ulteriormente alla seguente relazione.

$$k\nabla^2 T = 0$$

Le condizioni al contorno della sezione devono essere un parametro noto e può essere:

- superficie esterna soggetta ad una determinata temperatura costante o variabile nel tempo (si può inserire anche l'andamento temperatura-tempo determinato mediante l'analisi CFD);
- flusso esterno: $q = -k \frac{\partial T}{\partial n}$ dove q è il flusso di calore specifico e n è il vettore normale uscente rispetto alla superficie esterna.

Analisi meccanica con SAFIR

Il transitorio termico viene determinato attraverso una serie di successivi intervalli di tempo, garantendo l'equilibrio in ciascun intervallo tramite una serie di iterazioni.

In ogni punto di integrazione sulla struttura corrisponde:

- Ad un istante generico t_n con temperatura T_n , la deformazione legata alla tensione è pari a $\varepsilon_\sigma(T_n)$ e una deformazione plastica pari a ε_{pl} (vedi punto A in Figura 21);
- La temperatura calcolata nell'analisi termica pari a T_{n+1} viene letta nel file dell'analisi termica;
- L'incremento di deformazione termica $\Delta\varepsilon_{th}$ in ogni punto di integrazione è calcolato in base all'incremento di temperatura;
- Le proprietà del materiale sono aggiornate in funzione all'incremento di temperatura T_{n+1} . Di conseguenza, anche il legame costitutivo varia con la temperatura T_{n+1} rispetto al legame costitutivo alla temperatura T_n ;
- Gli spostamenti si mantengono costanti all'inizio dell'intervallo di tempo, pertanto anche la deformazione totale ε_{tot} rimane costante. L'incremento di deformazione $\Delta\varepsilon_{th}$ dovuta all'incremento di temperatura genera un nuovo valore di deformazione legato allo stato tensionale che nasce per effetto della temperatura $\varepsilon_\sigma(T_{n+1})$. Per un aumento della temperatura, la struttura viene "compressa artificialmente";

- Tenendo in conto del nuovo valore della deformazione legata alla tensione $\varepsilon_\sigma(T_{n+1})$, della legge tensione-deformazione a T_{n+1} e che la deformazione plastica è costante ε_{pl} si determina la nuova tensione e il modulo tangente dovuto alla variazione di temperatura (vedi punto B riportato in Figura 21).

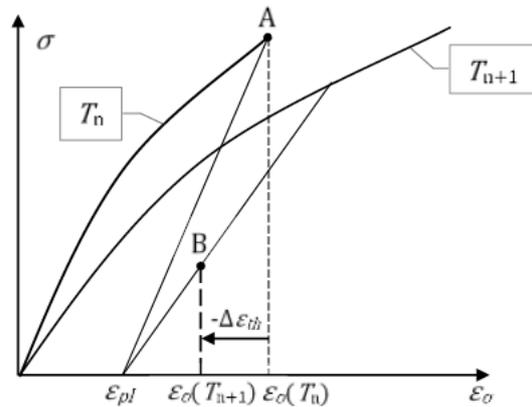


Figura 21: evoluzione dello stato tensionale durante la prima iterazione

Lo stato tensionale è integrato nel volume dell'elemento per garantire lo stato tensionale interno le quali non si trovano più in equilibrio con le forze nodali applicate. Quando la temperatura aumenta, la struttura subisce uno stato interno di compressione non bilanciata.

Analisi di un elemento BEAM

L'elemento BEAM è lineare nel suo asse prima di deformarsi. La sua posizione nello spazio è definita dalla posizione di tre nodi: due nodi (N1 e N2) che definiscono i punti esterni della trave, e un terzo nodo N4 che definisce l'orientazione dell'asse y del sistema di riferimento locale. Il nodo N3 è solo da supporto per un eventuale grado di libertà aggiuntivo.

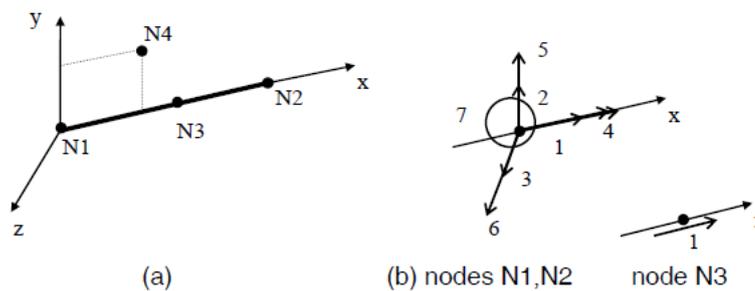


Figura 22: a) Elemento BEAM, b) gradi di libertà

Per descrivere la geometria della sezione, si utilizza il modello a fibre. La sezione della trave è suddivisa in fibre di forma (triangolare, quadrilatero o entrambe). Il comportamento meccanico delle fibre è determinato nel baricentro di ciascuna fibra ed è costante lungo la fibra stessa. Ogni fibra presenta il proprio materiale, questo permette lo studio anche delle sezioni composte da materiali differenti.

Ipotesi di base per lo studio dell'elemento trave sono:

- Considerazione dell'ipotesi di Bernoulli, deformazione piana della sezione soggetto ad un momento flettente;
- La plastificazione avviene solo lungo la direzione longitudinale delle fibre, che permette di modellare un modello uni assiale;
- Torsione non uniforme.

L'equazione di equilibrio locale lungo i tre assi principali è la seguente:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0$$

L'equazione di equilibrio nello spazio del singolo elemento è rappresentato dalla seguente equazione matriciale.

La rigidezza nei punti di integrazione è legata sul volume per calcolare la matrice simmetrica di rigidezza della struttura.

$$[K]\{u\} = \{P\}$$

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} & k_{1,4} & k_{1,5} & k_{1,6} & k_{1,7} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} & k_{2,4} & k_{2,5} & k_{2,6} & k_{2,7} \\ k_{3,1} & k_{2,3} & k_{3,3} & k_{3,4} & k_{3,5} & k_{3,6} & k_{3,7} \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & k_{4,4} & k_{4,5} & k_{4,6} & k_{4,7} \\ k_{5,1} & k_{5,2} & k_{5,3} & k_{5,4} & k_{5,5} & k_{5,6} & k_{5,7} \\ k_{6,1} & k_{6,2} & k_{6,3} & k_{6,4} & k_{6,5} & k_{6,6} & k_{6,7} \\ k_{7,1} & k_{7,2} & k_{7,3} & k_{7,4} & k_{7,5} & k_{7,6} & k_{7,7} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{Bmatrix}$$

Dove:

- $[K]$: è la matrice di rigidezza;
- $\{u\}$: vettore con gli spostamenti nodali;
- $\{P\}$: vettore delle forze esterne.

4.2.3. Post-processore Diamond

Il post-processore Diamond permette di visualizzare i risultati della simulazione eseguito con SAFIR.

4.3. Software cfd_fem_v0

Il software cfd_fem_v0 è sviluppato dal Politecnico di Torino, è un'interfaccia grafica che insieme a GmSAFIR permette di definire i file di input per il software di calcolo SAFIR.

Il software è diviso in due pagine:

- Analisi termica
- Analisi Meccanica

Analisi termica

Nell'analisi termica il software ti permette le seguenti operazioni:

- **Add Property:** definire la tipologia di sezione in base alle sue caratteristiche della sezione.
- **Trasform FDS output to .txt file:** permette di trasformare il file di output che FDS restituisce in formato .csv in tanti file .txt quanti sono i sensori presenti nel file.
- **Post process temeprature file:** permette di modificare la discretizzazione temporale dei file .txt creati dal secondo punto considerando che i due software non presentano la medesima discretizzazione. La discretizzazione avviene mediante una regressione di tipo lineare.
- **Given a prototype .in it creates same .in files with different time-temperature:** Considerando la numerosità degli elementi strutturali da analizzare, il processo di assegnare ad ogni elemento la curva temperatura-tempo e successivamente eseguire l'analisi termica è un'operazione tanto oneroso quanto sono gli elementi strutturali da analizzare. Pertanto, il software permette di creare i file .in (formato input per SAFIR) per ogni elemento strutturale.

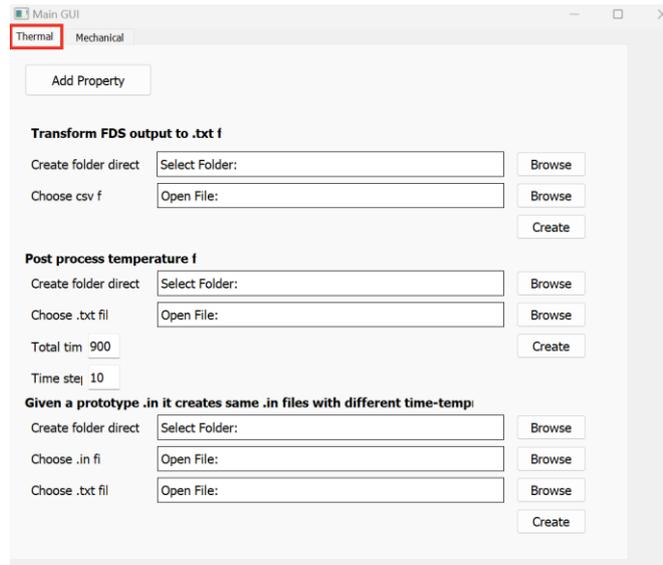


Figura 23: software cfd_fem_v0 – analisi termica

Analisi meccanica

Nell'analisi meccanica il software ti permette le seguenti operazioni:

- **Retrieve structure info from .geo:** Permette di ruotare e traslare opportunamente la struttura dell'analisi strutturale per coincidere con la geometria dell'analisi CFD.
- **Create devices in FDS:** permette di posizionare i sensori automaticamente sulla geometria dell'analisi CFD.

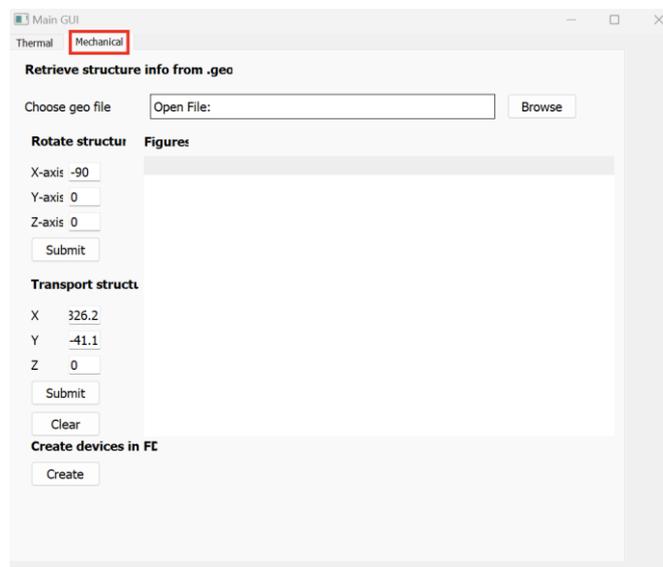
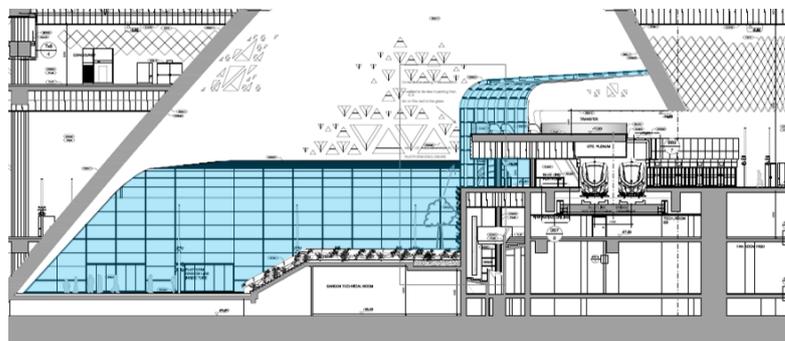


Figura 24: software cfd_fem_v0 – analisi meccanica

5. CASO STUDIO

Il caso studio è la struttura in vetro-acciaio di una stazione metropolitana che separa le due piattaforme ferroviarie dal resto della struttura e permette la formazione di un atrio grande dove le persone possono attendere l'arrivo della metropolitana.



 **STRUTTURA VETRO-ACCIAIO**

Figura 25: struttura in vetro acciaio – vista in sezione

5.1. Analisi fluidodinamica

L'analisi fluidodinamica è stata condotta mediante l'analisi agli elementi finiti attraverso il software FDS.

5.1.1. Geometria

L'edificio in analisi è una stazione metropolitana interrata che si sviluppa su 8 livelli interrati per una profondità di circa 40 metri.

L'edificio non dispone di un sistema di spegnimento, per cui non si considera nessun effetto di mitigazione sull'incendio.

Lo smaltimento dei fumi e il riscontro di aria fresca sono garantiti mediante le aperture in corrispondenza dell'ingresso alla stazione al piano terra.

La struttura in vetro-acciaio è incastrata alla base e sulla testa in corrispondenza del muro a forma di cono che circonda la parte centrale della stazione metropolitana (vedi Figura 26).

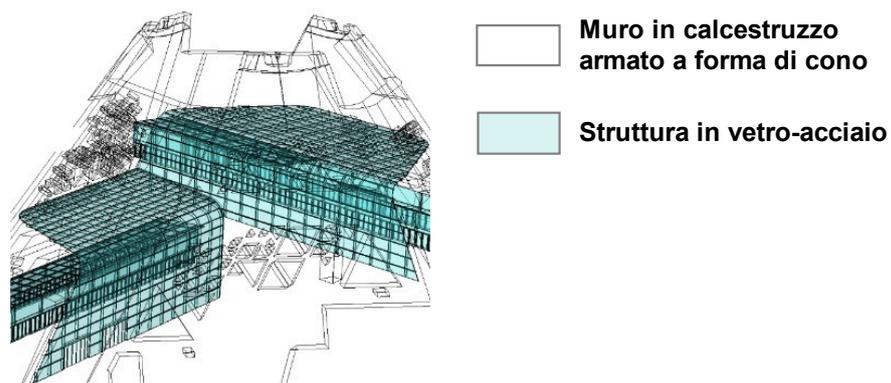


Figura 26; struttura in vetro acciaio – vista in assonometria

5.1.2. Scenari di incendio

In Tabella 8 si riportano gli scenari di incendio più gravosi per la valutazione della resistenza strutturale della struttura in vetro-acciaio.

Tabella 8: scenari di incendio

Posizione	Ambiente	Vista in assonometria
1	Atrio	
2		

In Tabella 9 si riporta il criterio di scelta degli scenari di incendio.

Tabella 9: criterio di scelta degli scenari d'incendio

Scenario	Caratteristiche dell'ambiente sede d'innesco	Relazione tra posizione e l'ambiente sede d'innesco	Sorgente d'innesco	Tipologia di combustibile
1	Superficie=1700 m ² Altezza= 12 m	Incendio si trova vicino alla struttura in vetro-acciaio in corrispondenza alla zona con altezza inferiore tale da favorire l'accumulo dei fumi	Accensione diretta (fiamma diretta, cortocircuito)	Combustibile generico (D.M. 18/10/2019)
2		L'incendio si trova vicino alla struttura in vetro-acciaio in posizione centrale, questa configurazione corrisponde alla maggiore diffusione dei fumi.		

5.1.3. Curva HRR di progetto

Dall'esame degli arredi presenti negli spazi della stazione in esame, lo scenario più probabile ai fini della determinazione della curva temperatura-tempo è quello che riguarda l'innesco che possa propagare a un certo numero di sedie.

L'incendio è stato pertanto modellato a partire dalla curva sperimentale d'incendio di un gruppo di cinque sedie reperibile in letteratura [20].

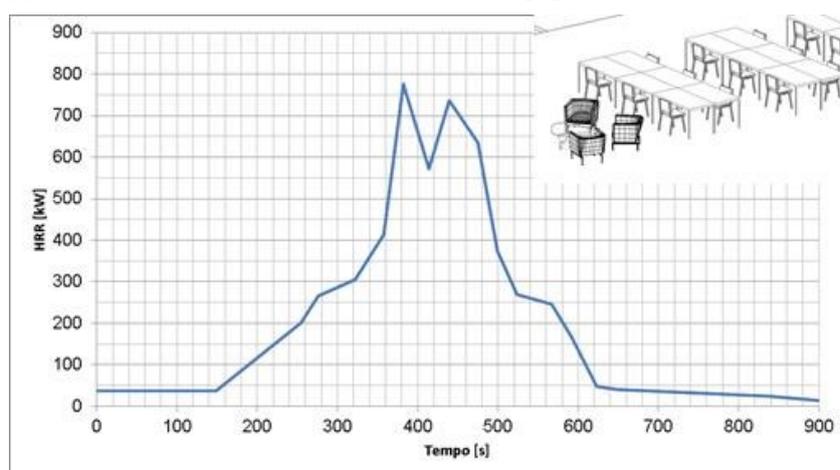


Figura 27: curva HRR di progetto

²⁰ SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3, Hazard Calculations

La curva HRR di tipo sperimentale raggiunge il valore di picco di circa 800 kW, poi decresce fino all'istante (960 secondi) cui corrisponde il completo esaurimento del materiale.

5.1.4. Combustibile, griglia di calcolo e periodo di osservazione

Il processo di combustione è modellato mediante un combustibile equivalente, caratterizzato da una composizione chimica (C, H, O e N), dalla resa in cenere (soot) e monossido di carbonio (CO). La reazione di combustibile è utilizzata è quella del focolare predefinito [21].

Tabella 10: combustibile

Combustibile equivalente	Focolare predefinito
C - H - O - N	1.0 - 2.0 - 0.5 - 0
Soot yield [kg/kg]	0.03 [22]
CO yield [kg/kg]	0.1

La dimensione della griglia è scelta in base della potenza massima dell'incendio utilizzato il diametro caratteristico dato dalla seguente formula.

$$D = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Dove:

- Q è la potenza dell'incendio;
- ρ_{∞} rappresenta la densità della zona indisturbata
- c_p il calore specifico dell'aria;
- T_{∞} temperatura della zona indisturbata dall'incendio;
- g l'accelerazione di gravità;

Tabella 11: griglia di calcolo

Scenario	D	In prossimità dell'incendio	Resto del dominio
S1 e S2	0.912	(0.1 x 0.1 x 0.1) m ³	(0.2 x 0.2 x 0.2) m ³

Il periodo di osservazione è di 18 minuti e coincide con la durata della curva HRR di progetto.

²¹ Capitolo M2.7 Focolare Predefinito del D.M. 18/10/2019

²² L. Staffansson, Selecting design fires (Lund 2010), chapter 10 (tab.10.6.)

5.1.5. Scambio termico con superfici solide

Le simulazioni tengono conto dello scambio termico tra i prodotti di combustione e le pareti dell'edificio. In Tabella 12 si riportano le caratteristiche termo-fisiche dei materiali analizzati.

Tabella 12: caratteristiche termo-fisiche dei materiali

Materiale	Densità [kg/m ³]	Conducibilità termica [W/mK]	Calore specifico [kJ/kg K]	Emissività [-]
Cemento [23]	2280	1.80	1.04	0.9
Acciaio [24]	7850	45.8	0.46	0.95
Vetro [25]	2700	0.78	0.84	0.9

5.1.6. Modello CFD

In Figura 28 si riporta il modello CFD modellato mediante il software Pyrosim.

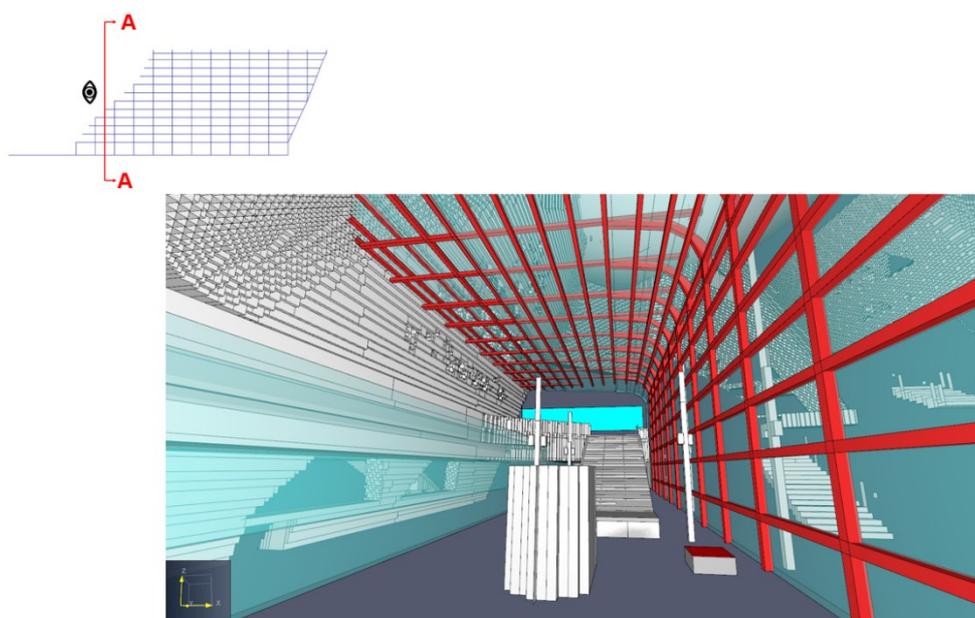


Figura 28: modello CFD – vista AA

²³ NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation

²⁴ Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation

²⁵ Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation

5.1.7. Sensori di temperatura

I sensori che determinano la temperatura sull'elemento strutturale in prossimità dell'incendio sono degli Adiabatic Surface Temperature AST (gas e solido), tali sensori misurando la temperatura adiabatica superficiale dei gas in prossimità dell'incendio. Questi sensori sono in grado di determinare la temperatura in prossimità degli elementi strutturali verticali prossimi all'incendio tenendo in conto oltre al contributo convettivo anche di quello radiativo dell'incendio. Entrambi i sensori sono in grado di determinare la temperatura in prossimità dell'elemento strutturale tenendo conto del contributo convettivo e radiativo dell'incendio. La scelta di inserirli entrambi è semplicemente per una ragione esaustiva, considerando che AST solido per valutare la temperatura dell'elemento strutturale necessita la presenza vicina dell'elemento strutturale oltre che dell'orientamento del sensore seguendo la normale della superficie dell'elemento strutturale. Gli AST gas invece non necessita della presenza del solido in quanto si inseriscono le proprietà termiche dell'elemento prima della simulazione.

In Figura 29 si riportano le due tipologie di sensori utilizzati. Si può notare come i sensori AST gas contengono le proprietà del solido (emissività e conducibilità termica), inoltre si può notare come i due sensori siano posizionati sulla medesima posizione e con la stessa orientazione.

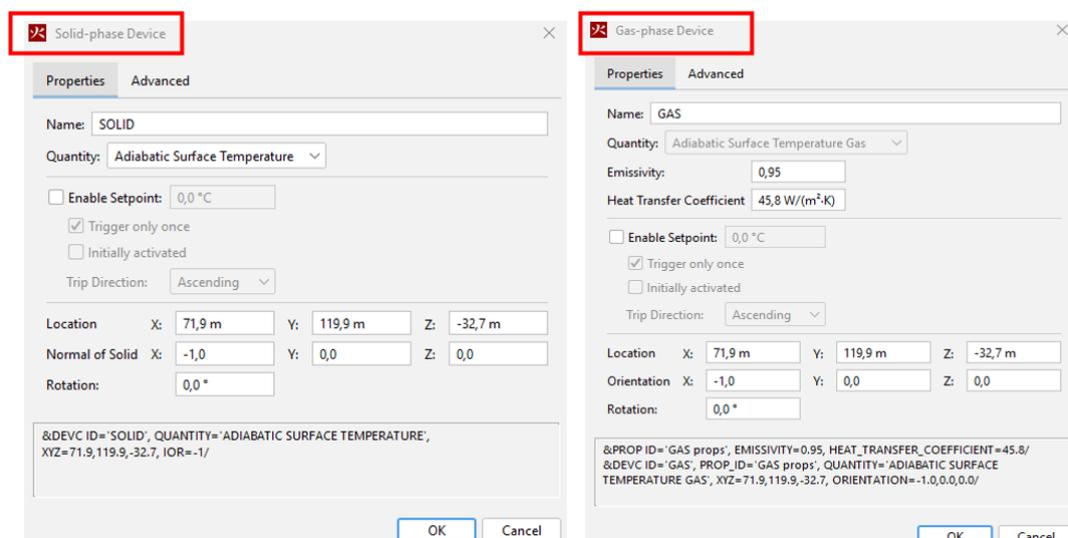


Figura 29: Sensore di temperatura – AST (solid,gas)

La temperatura in copertura può essere misurata sia attraverso l'utilizzo dei sensori di AST che dei sensori di temperatura o termocoppia, entrambe sono in grado di misurare correttamente la temperatura in copertura.

5.2. Analisi strutturale

Lo studio della resistenza a caldo della struttura è stato condotto svolgendo un'analisi agli elementi finiti (FEM) attraverso il software di calcolo SAFIR™.

5.2.1. Geometria

La geometria in analisi è la struttura in vetro-acciaio composta da elementi strutturali in acciaio con sezione a T e rettangolare (vedi Figura 30), le misure sono espresse in millimetri. Il vetro presenta uno spessore di 4.5 cm.

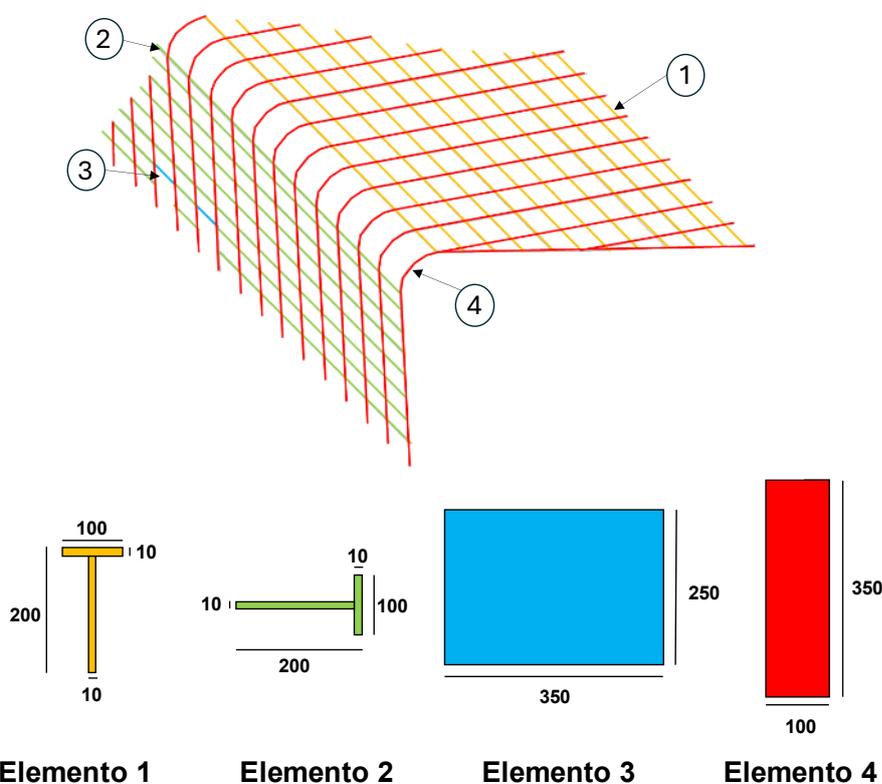


Figura 30: geometria SAFIR – sezioni trasversali

5.2.2. Materiali

Lo studio è focalizzato sull'acciaio strutturale con denominazione S235JR, in Tabella 13 si riportano le caratteristiche meccaniche a temperatura ambiente.

Tabella 13: Caratteristiche meccaniche acciaio

Caratteristica meccanica	Descrizione	Valore
f_{yk}	Tensione di snervamento	235 N/mm ²
f_u	Tensione ultima	360 N/mm ²
E	Modulo elastico	210 000 N/mm ²
-	Energia di resilienza minima	27 Joule

Al fine del comportamento strutturale, non si considera cautelativamente il contributo del vetro sull'analisi meccanica.

5.2.3. Analisi dei carichi

Combinazione dei carichi

La norma NTC 17/01/2018 classifica l'azione dell'incendio come azione accidentale (riportato con il riquadro rosso) e per tal motivo la combinazione utilizzata è la combinazione eccezionale (vedi Figura 31).

2.5.3. COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite, si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.1]
- Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.2]
- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.3]
- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.4]
- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.5]
- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.6]

Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad [2.5.7]$$

Figura 31: combinazione delle azioni – NTC 17/01/2018

Analisi dei carichi

In Tabella 14 si riportano i carichi gravanti sulla struttura in esame.

Tabella 14: analisi dei carichi

Nominazione	Descrizione	Elementi strutturale	Valore
G1	Carichi permanenti strutturali (peso proprio degli elementi strutturali)	Elemento 1	0.224 kN/m
		Elemento 2	0.224 kN/m
		Elemento 3	2.674 kN/m
		Elemento 4	6.738 kN/m
G2	Carichi permanenti non strutturali (peso proprio del vetro che grava sugli elementi strutturali)	Elemento 1	-
		Elemento 2	-
		Elemento 3	-
		Elemento 4	0.320 kN/m
P	Precompressione	-	-
A _d	Azine di incendio	Tutti	Tenuto in conto dal software
Q _{k1}	Sovraccarico accidentale	-	-
Ψ ₂₁	Coefficiente di combinazione	-	0.6 [26]

²⁶ Valore raccomandato dalla norma EN 1991-1-2 ed è possibile trovarlo nella NTC 17/01/2018 tab, 2.5.I. Cat.C.

5.2.4. Periodo di osservazione

Il periodo di osservazione del transitorio termico coincide con l'intera durata dell'incendio ($t=1800s$).

6. RISULTATI

In questo capitolo si riportano i risultati analizzati mediante i software di calcolo,

6.1. Risultati analisi CFD

In seguito, si riportano i risultati dell'analisi CFD.

6.1.1. Scenario 1

6.1.1.1. Andamento dei fumi

In Tabella 15 si riportano i plot dell'andamento dei fumi a degli istanti significativi dell'incendio. I pattern dei fumi sono rappresentati con una isosuperfici di visibilità costante al valore di 10m. In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

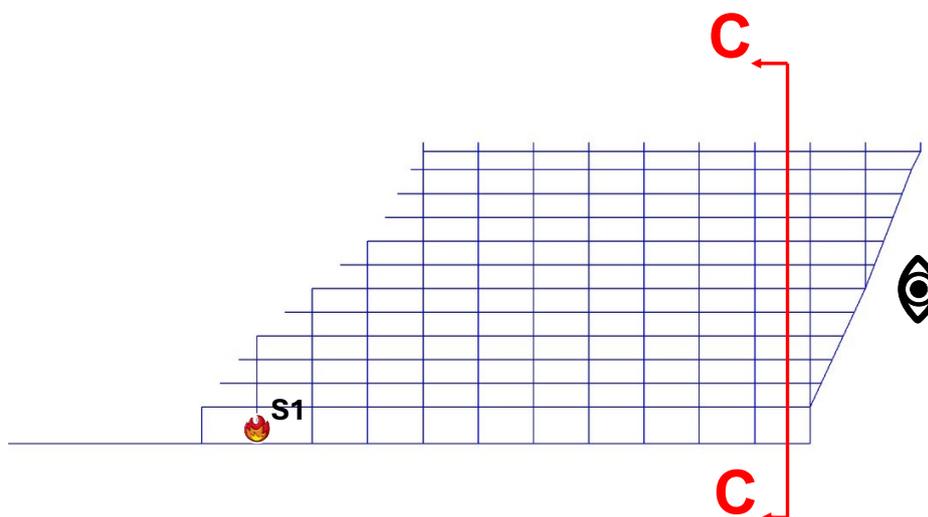
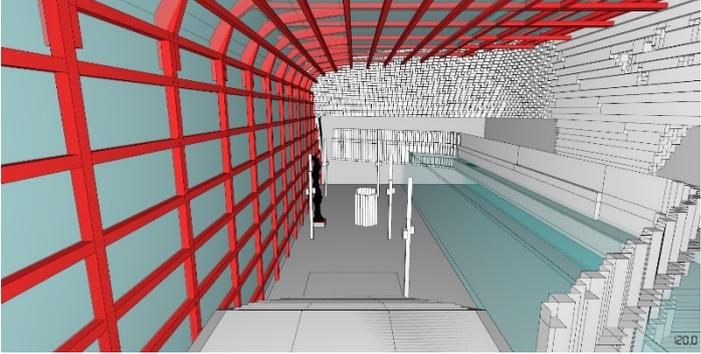
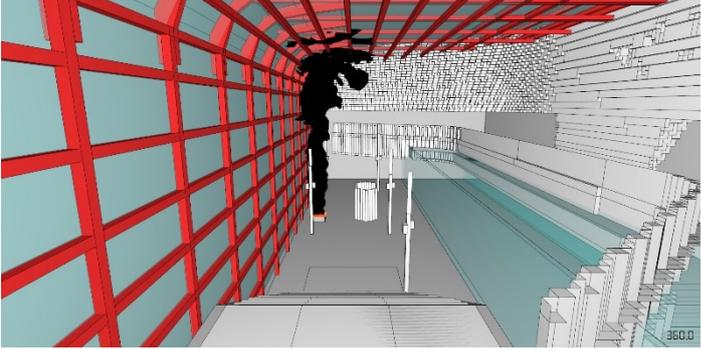
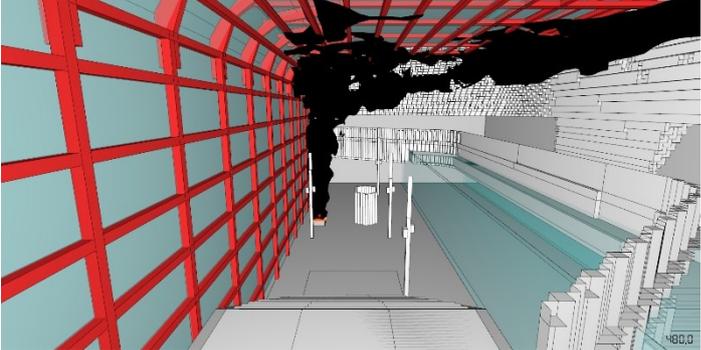
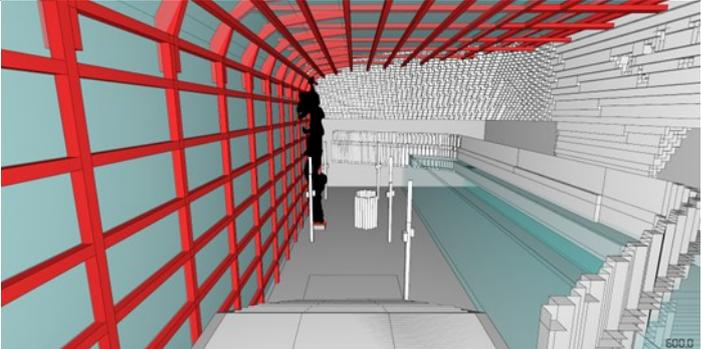
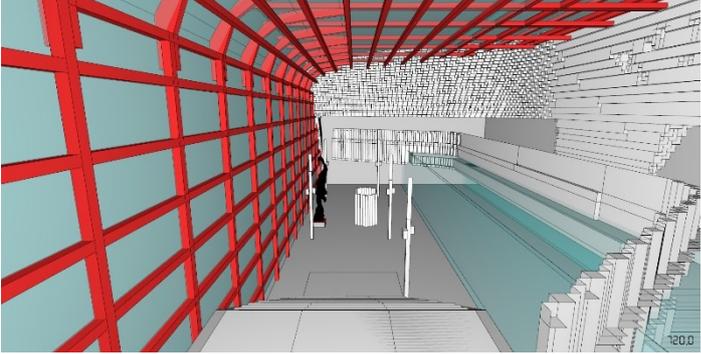
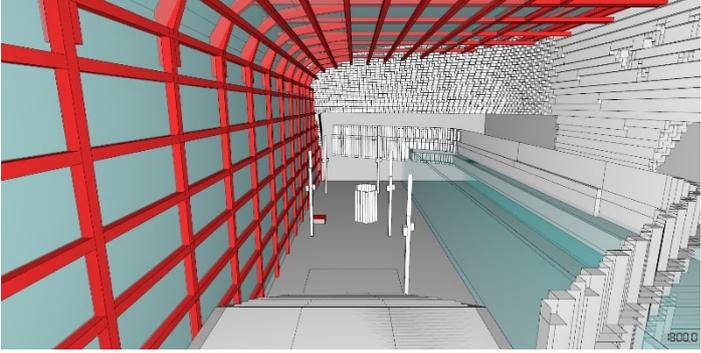


Figura 32: vista CC – scenario 1

Tabella 15: andamento dei fumi – scenario 1

Tempo	Pattern dei fumi
0s	

120s	
360s	
480s	
600s	

720s	
1800s	

6.1.1.2. *Temperatura Adiabatica Superficiale*

In Tabella 16 si riportano i plot di temperatura adiabatica superficiale a degli istanti significativi dell'incendio sulla superficie degli elementi strutturali.

I plot di temperatura sono riportati con la soglia della temperatura massima che l'elemento strutturale in prossimità dell'incendio è soggetto. In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

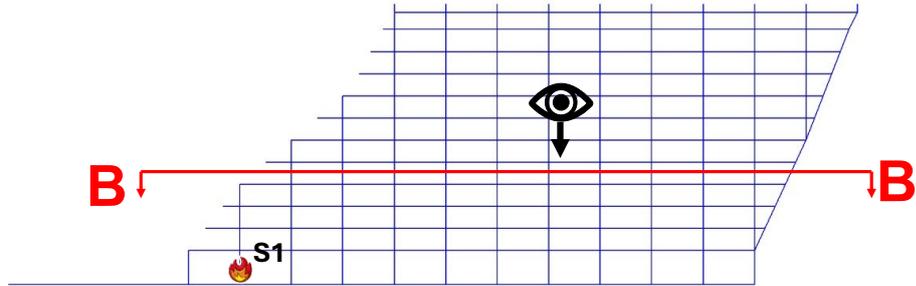
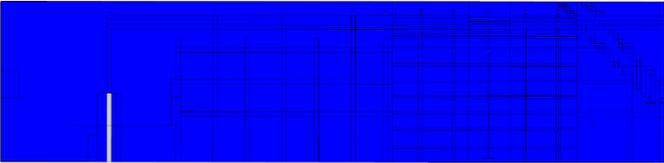
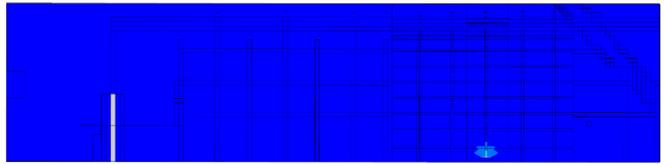
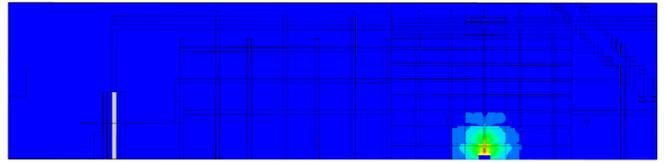
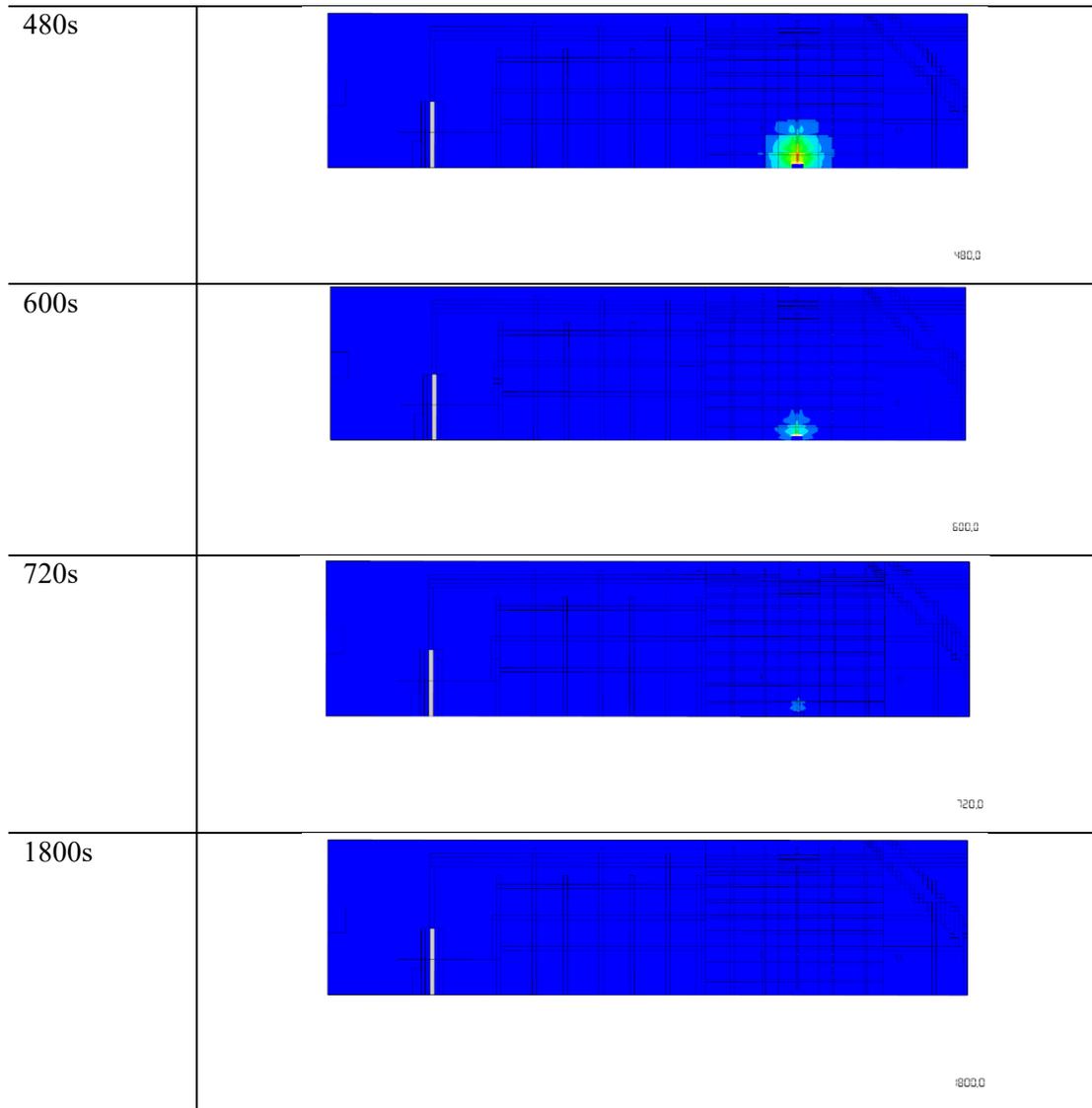


Figura 33: Vista plot temperatura adiabatica superficiale – scenario 1

Tabella 16: Temperatura adiabatica superficiale – scenario 1

Tempo	Temperatura superficiale	adiabatica	°C
0s			20 96 172 248 324 400
120s			0.0
360s			360.0



6.1.1.3. Temperatura dei gas

In Tabella 17 si riportano i plot di temperatura dei gas a degli istanti significativi dell'incendio sulla superficie degli elementi strutturali.

I plot di temperatura sono riportati con la soglia della temperatura massima che l'elemento strutturale in prossimità dell'incendio è soggetto. In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

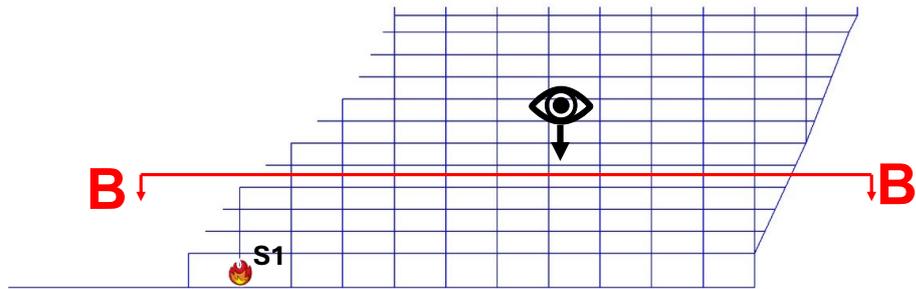
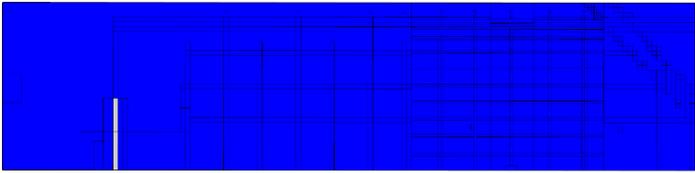
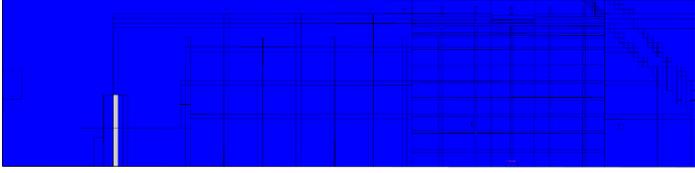
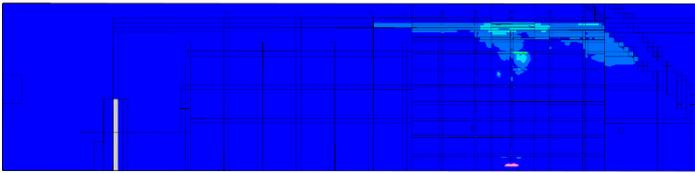
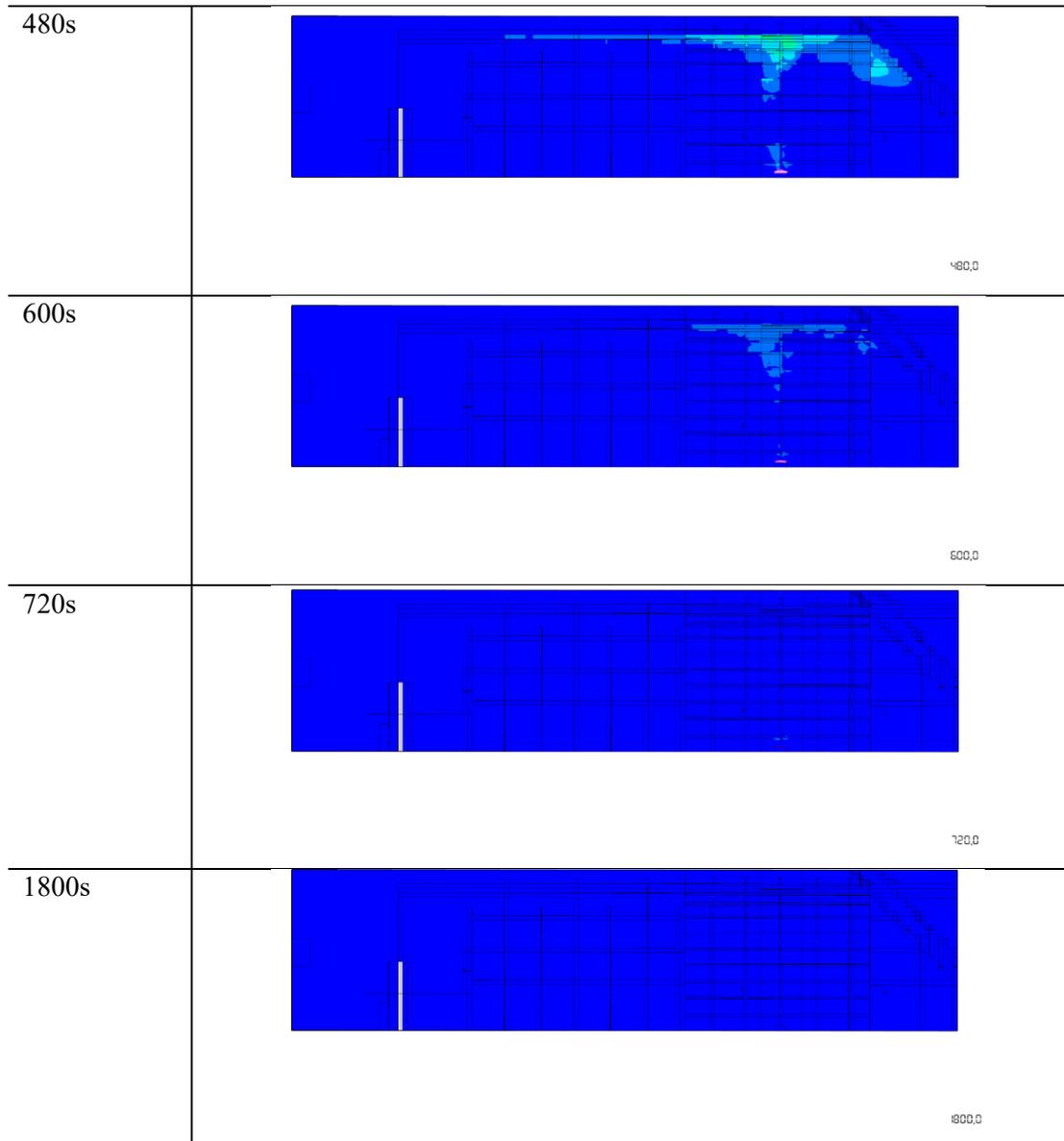


Figura 34: Vista plot temperature dei gas- scenario 1

Tabella 17: temperatura dei gas – scenario 1

Tempo	Temperatura dei gas
0s	 <p>0.0</p>
120s	 <p>20.0</p>
360s	 <p>360.0</p>



6.1.1.4. Irraggiamento termico

In Tabella 18 si riportano i plot di irraggiamento a degli istanti significativi dell'incendio sulla superficie degli elementi strutturali.

I plot di irraggiamento sono riportati con la soglia della massima di 3 kW/m^2 . In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

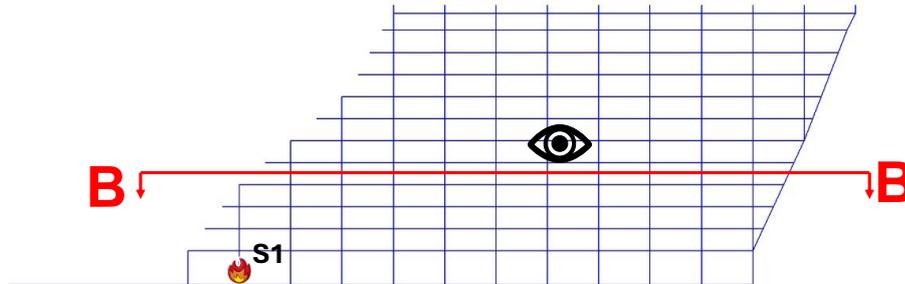
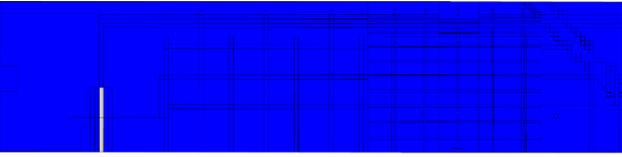
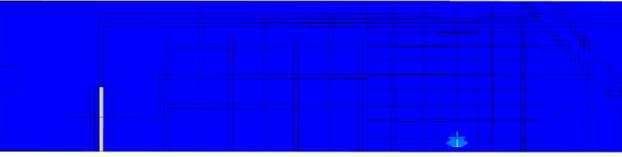
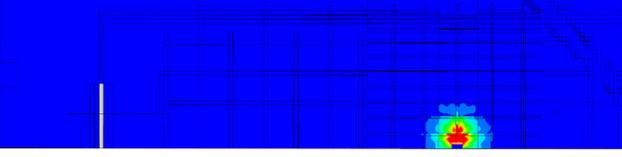
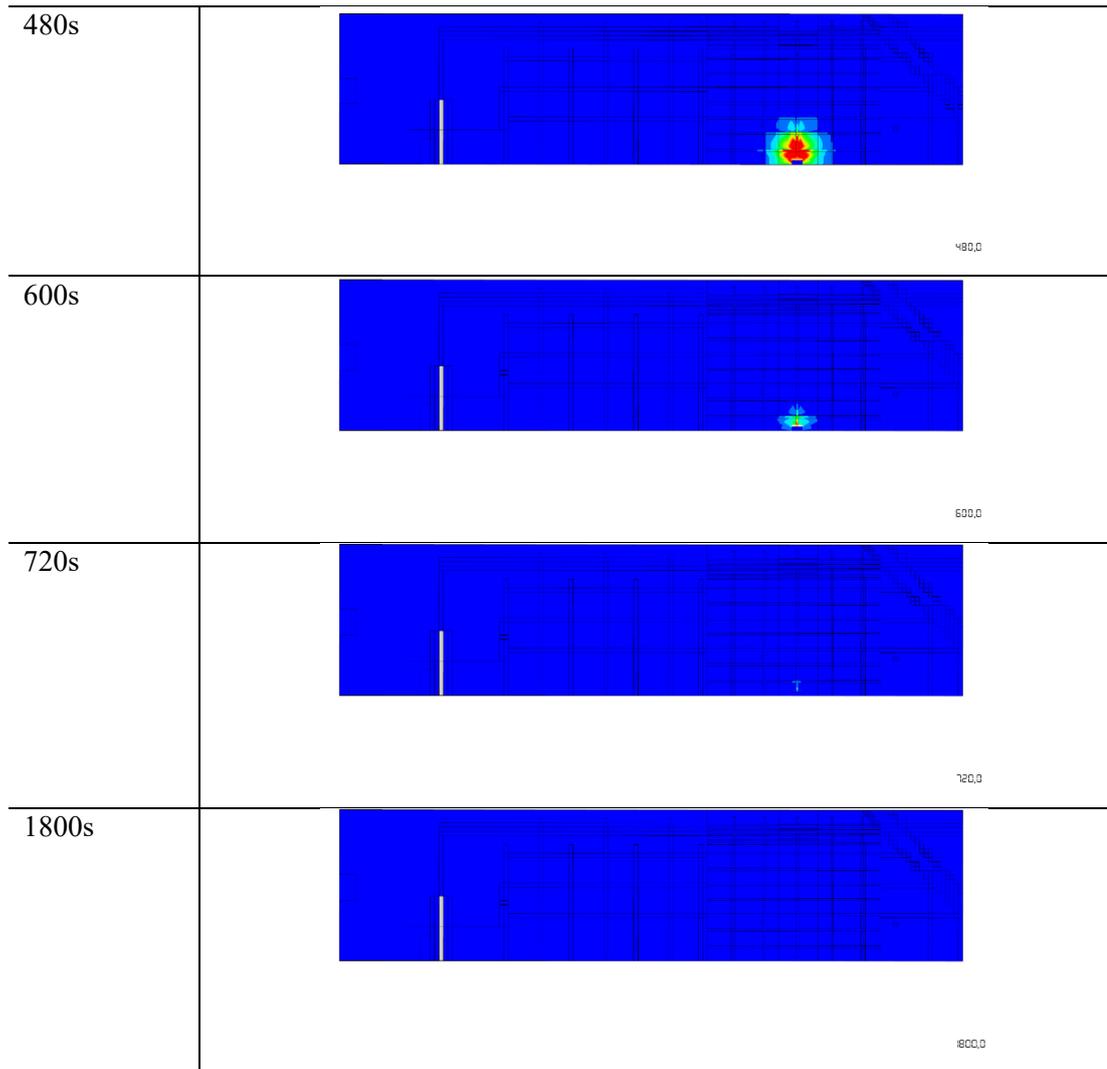


Figura 35: irraggiamento– scenario 1

Tabella 18: irraggiamento – scenario 1

Tempo	Irraggiamento [kW/m ²]
0s	 <p style="text-align: right;">0,0</p>
120s	 <p style="text-align: right;">120,0</p>
360s	 <p style="text-align: right;">360,0</p>



6.1.1.5. Curva Temperatura-Tempo

La temperatura massima dei gas registrata in prossimità della colonna in acciaio (riportato in riquadro nero) alla quota 1m dal piano di calpestio è di circa 400 °C. In Figura 36 è riportato la posizione del sensore virtuale attraverso il quale viene registrata la temperatura all'interno della simulazione. In giallo la posizione dove è posizionato il sensore.

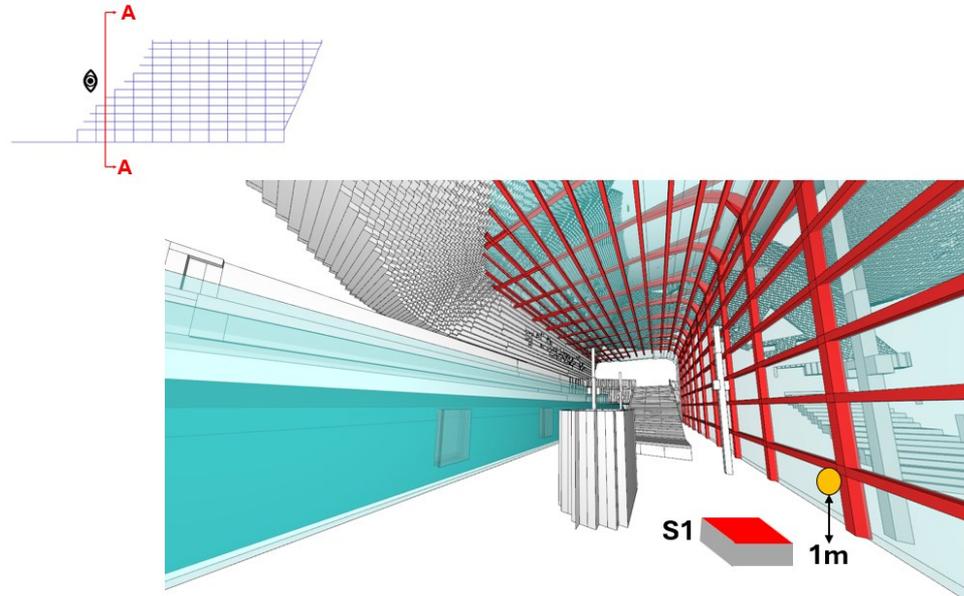


Figura 36: posizione del sensore (scenario 1)

In Figura 37 si riporta l'andamento della temperatura-tempo.

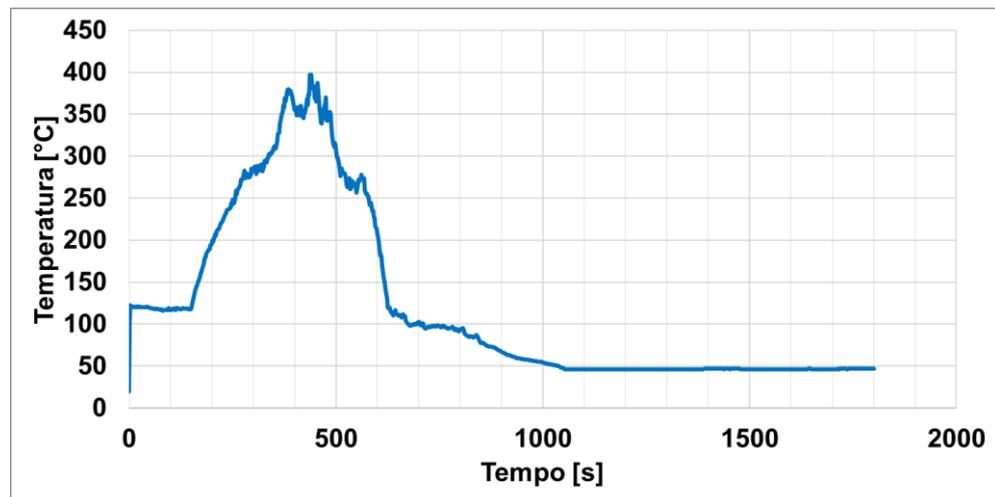


Figura 37: Curva temperatura-tempo

6.1.2. Scenario 2

6.1.2.1. Andamento dei fumi

In Tabella 19 si riportano i plot dell'andamento dei fumi a degli istanti significativi dell'incendio. I pattern dei fumi sono rappresentati con una isosuperfici di visibilità costante al valore di 10m. In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

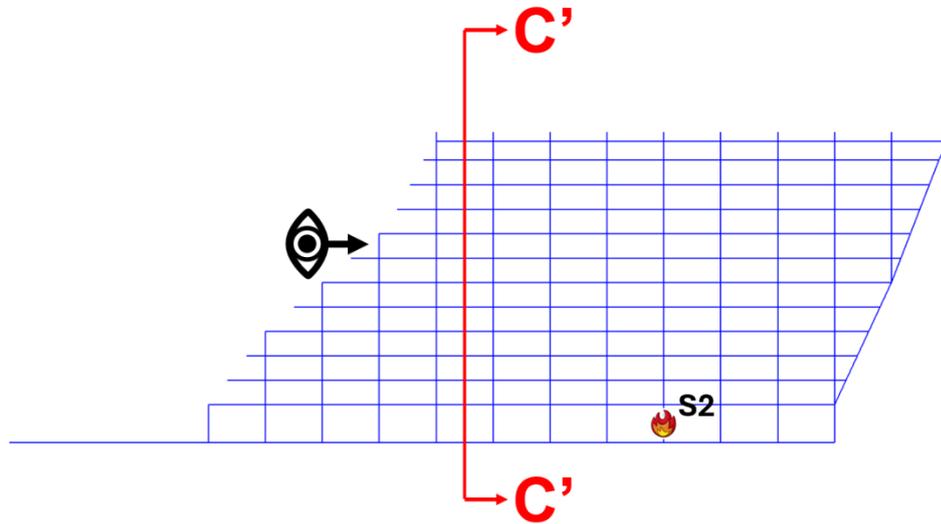
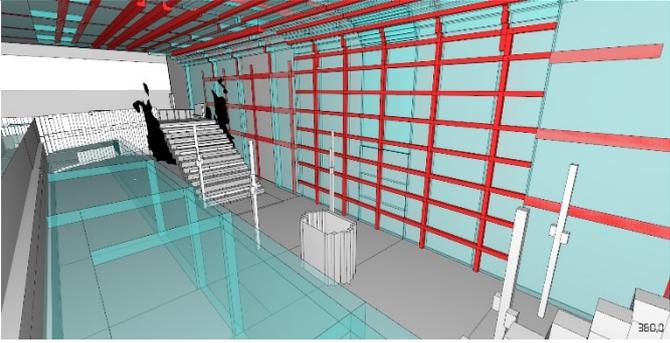
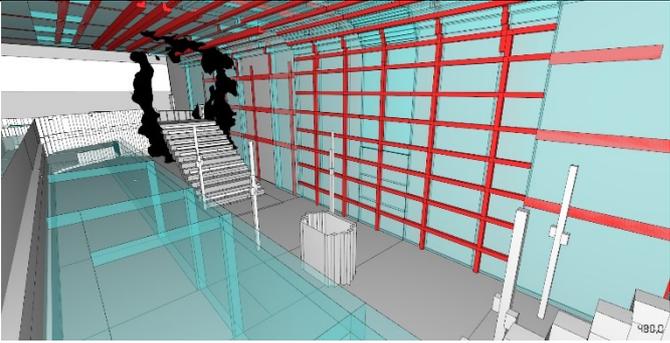
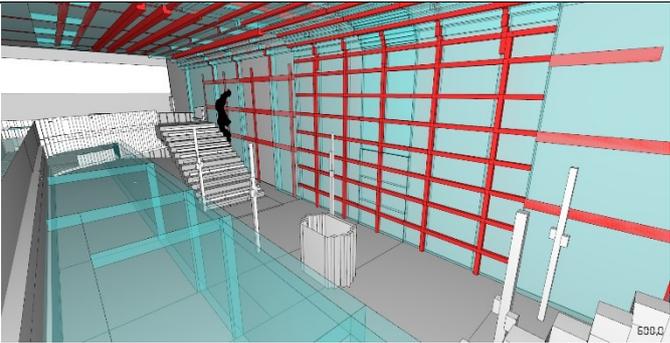
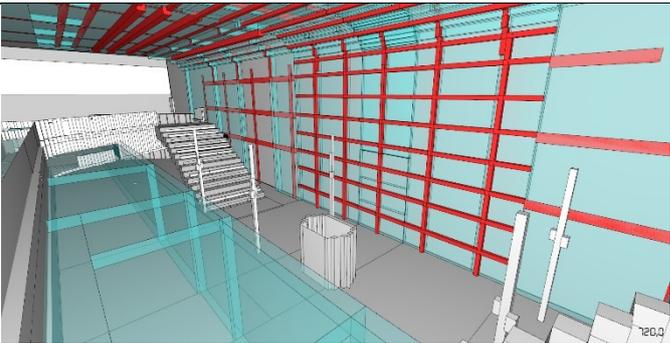
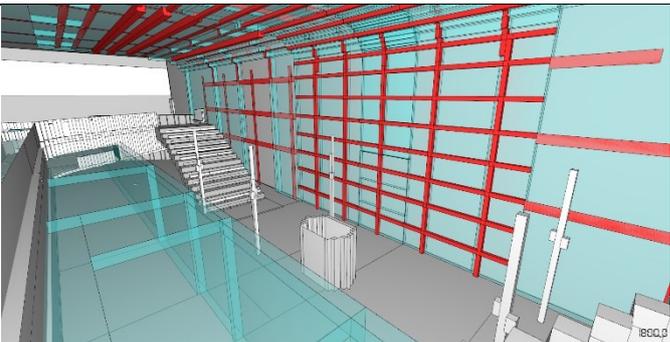


Figura 38: vista C'C' – scenario 2

Tabella 19: andamento dei fumi – scenario 2

Tempo	Pattern dei fumi
0s	
120s	

360s	
480s	
600s	
720s	
1800s	

6.1.2.2. Temperatura Adiabatica Superficiale

In Tabella 20 si riportano i plot di temperatura adiabatica superficiale a degli istanti significativi dell'incendio sulla superficie degli elementi strutturali.

I plot di temperatura sono riportati con la soglia della temperatura massima che l'elemento strutturale in prossimità dell'incendio è soggetto. In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

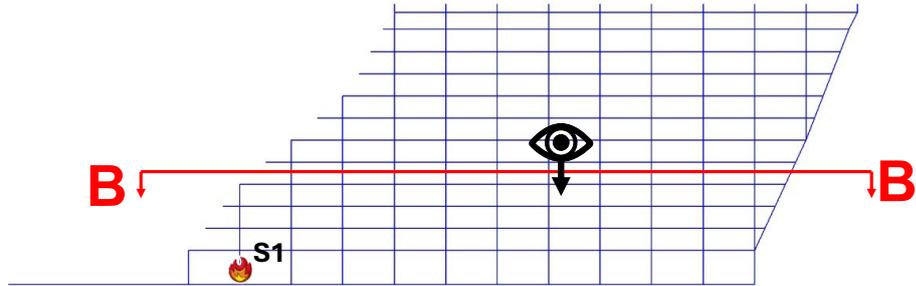
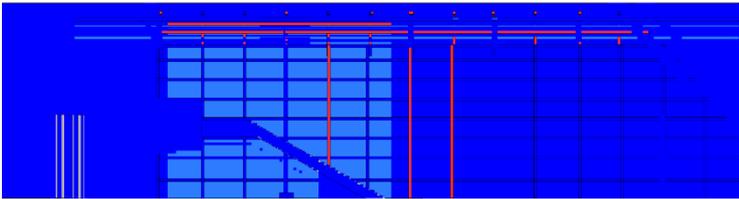
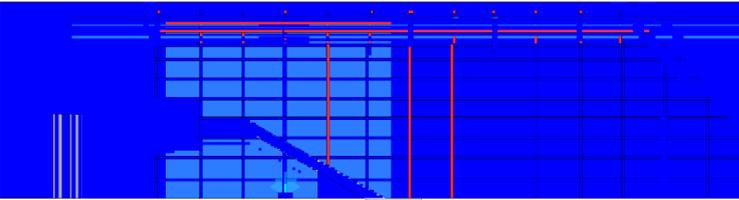
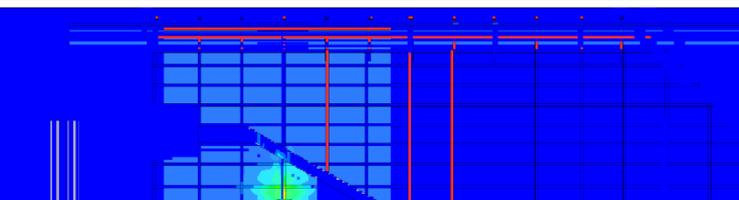
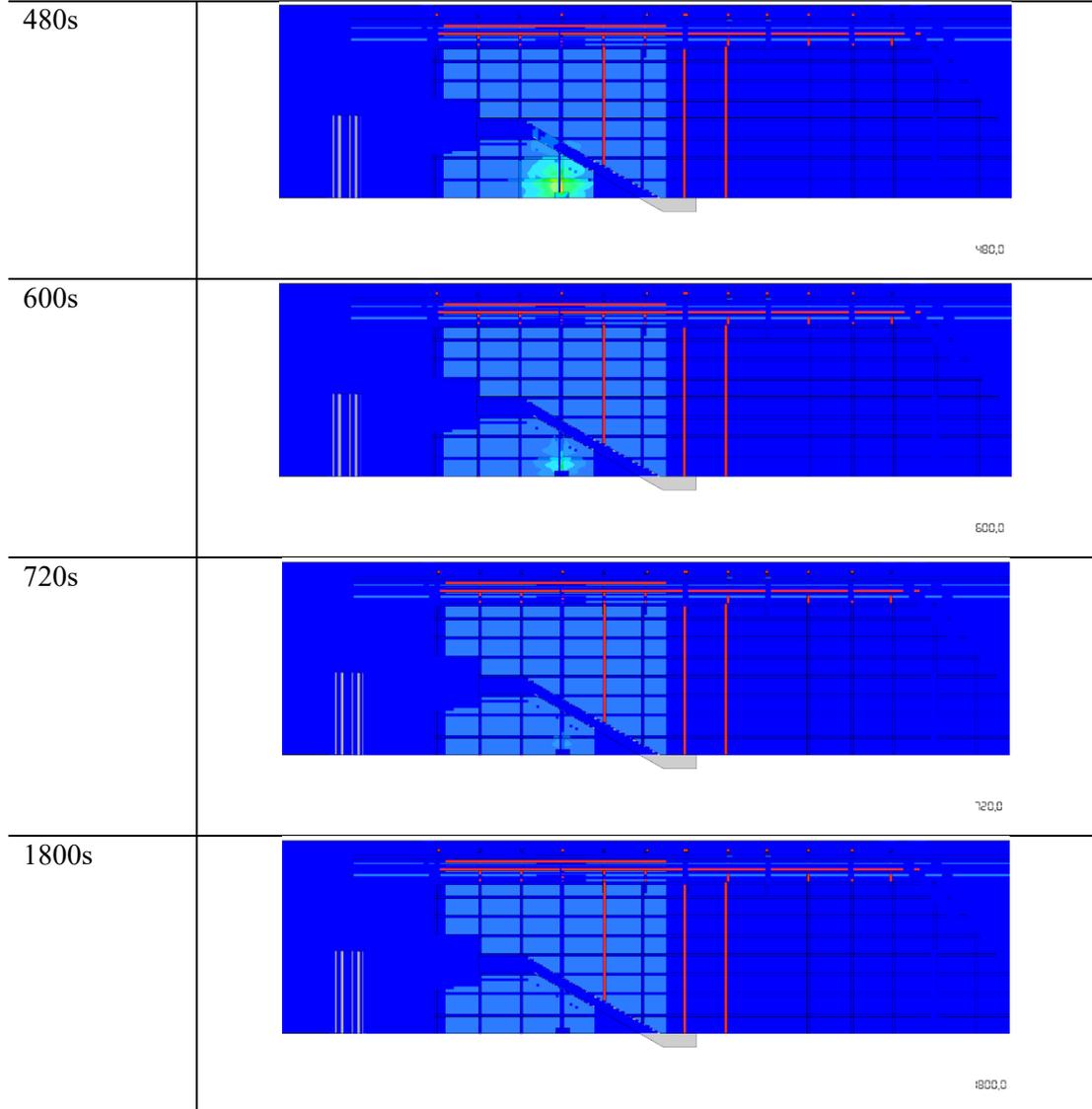


Figura 39: Vista plot temperatura adiabatica superficiale – scenario 2

Tabella 20: Temperatura adiabatica superficiale – scenario 2

Tempo	Temperatura superficiale	adiabatica	°C
0s			20 96 172 248 324 400
120s			120.0
360s			360.0



6.1.2.3. Temperatura dei gas

In Tabella 21 si riportano i plot di temperatura dei gas a degli istanti significativi dell'incendio sulla superficie degli elementi strutturali.

I plot di temperatura sono riportati con la soglia della temperatura massima che l'elemento strutturale in prossimità dell'incendio è soggetto. In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

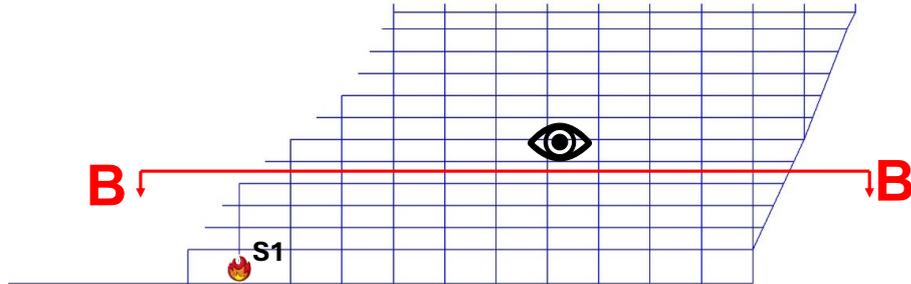
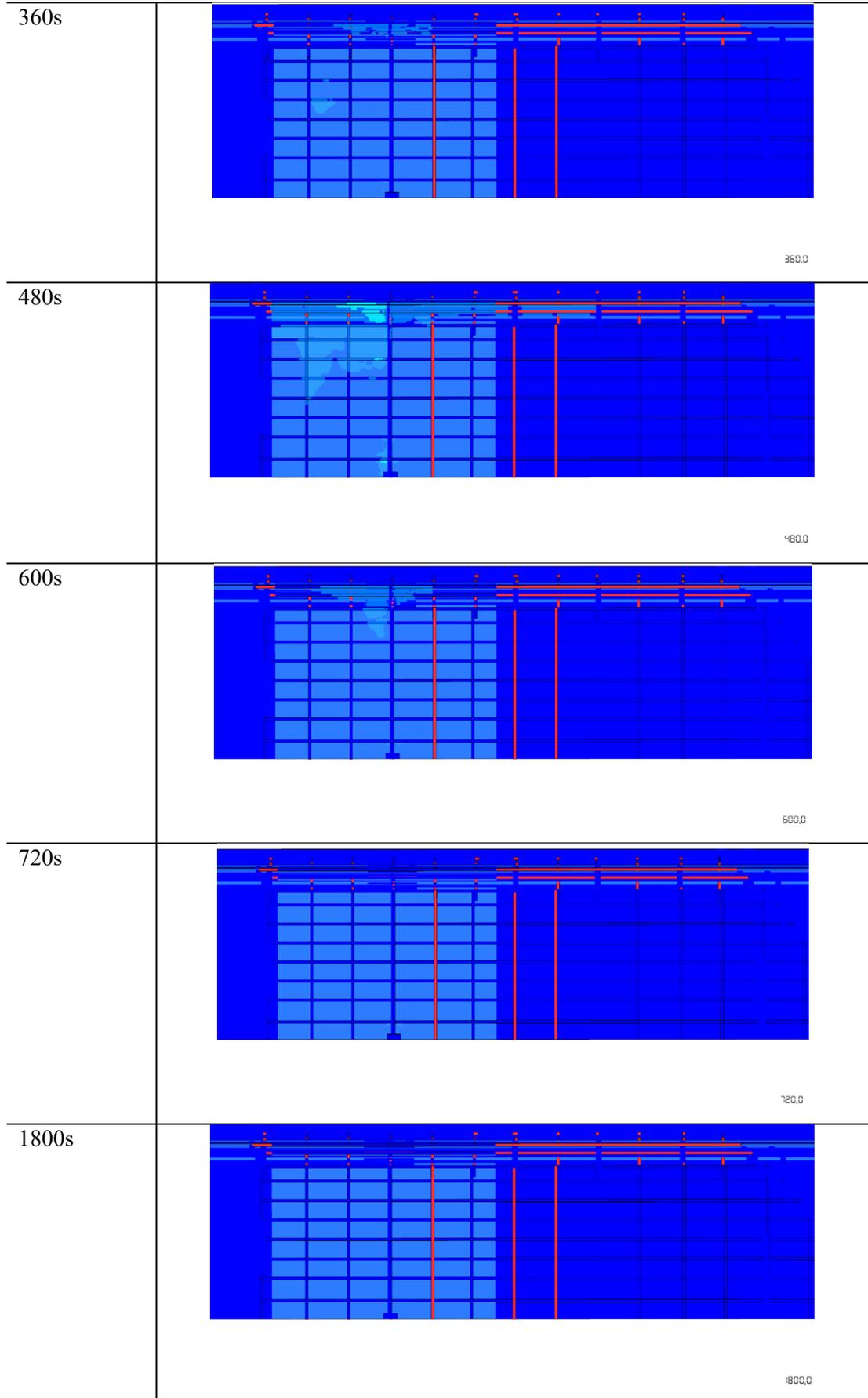


Figura 40: Vista plot temperature dei gas – scenario 2

Tabella 21: temperatura dei gas – scenario 2

Tempo	Temperatura dei gas
0s	<p>0.0</p>
120s	<p>120.0</p>



6.1.2.4. Irraggiamento termico

In Tabella 22 si riportano i plot di irraggiamento a degli istanti significativi dell'incendio sulla superficie degli elementi strutturali.

I plot di irraggiamento sono riportati con la soglia della massima di 3 kW/m^2 . In seguito, si riporta la vista di come sono presi i plot di temperatura.

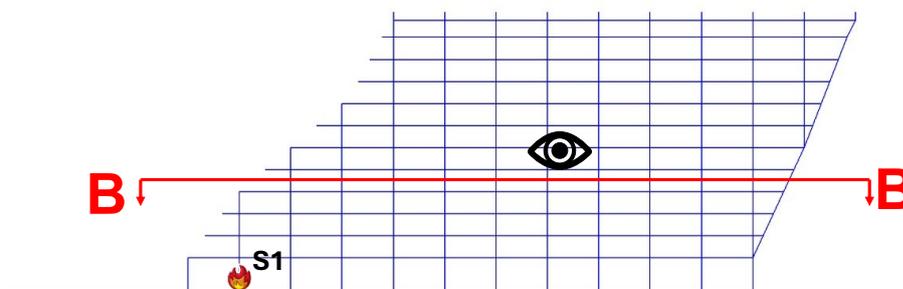
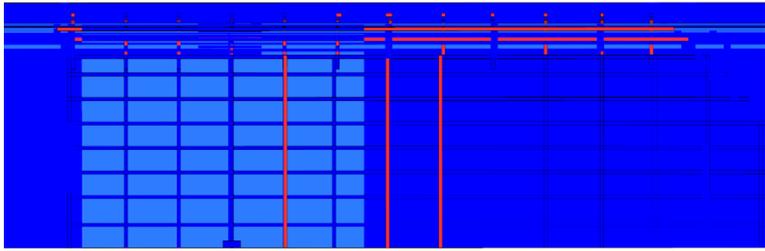
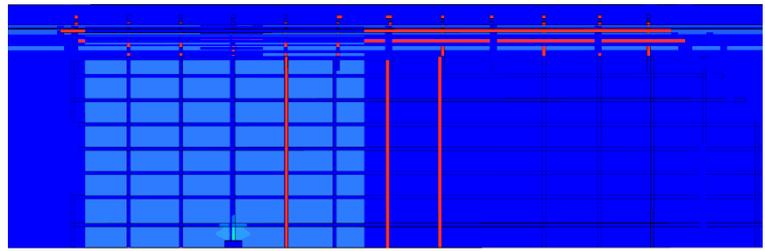
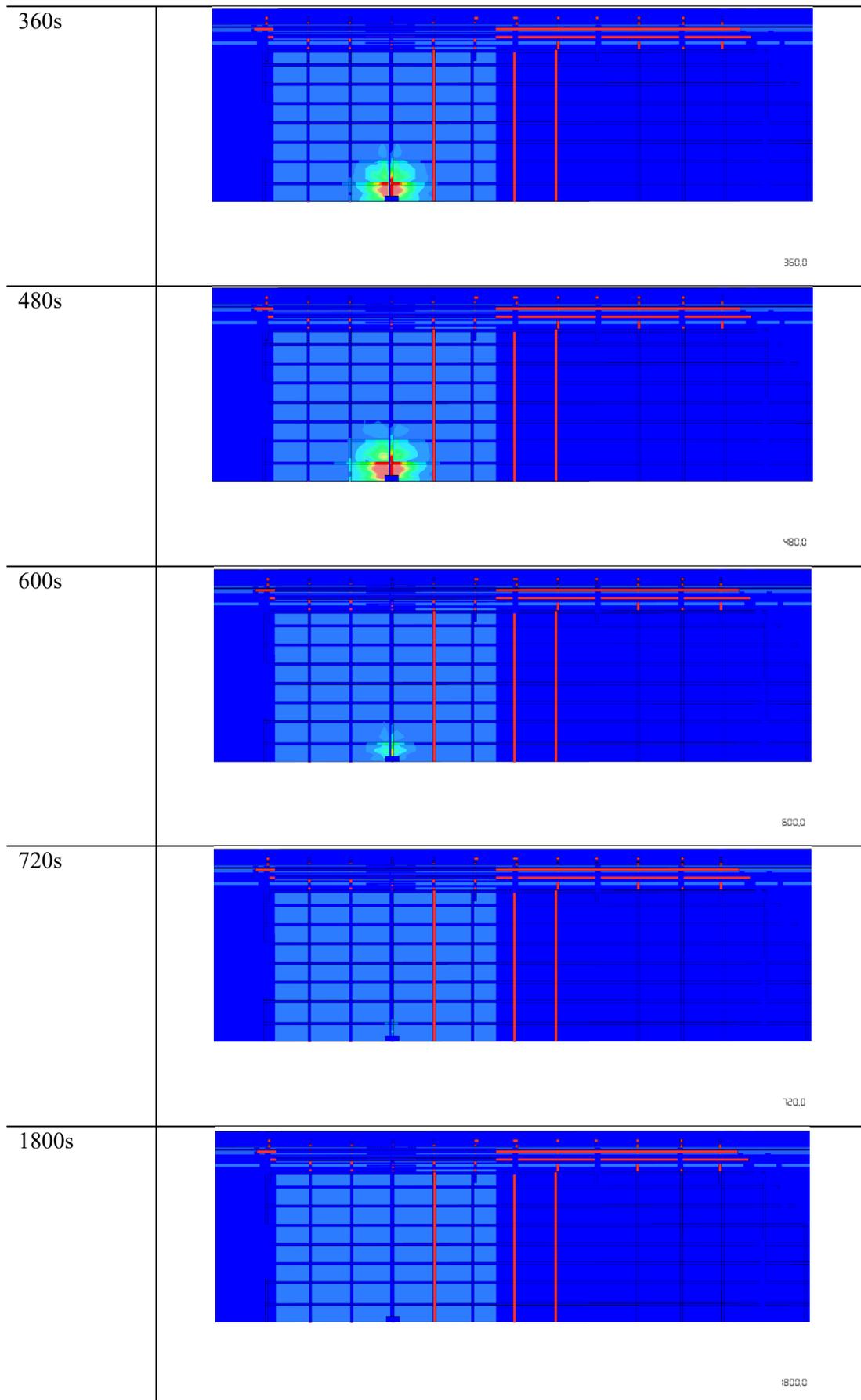


Figura 41: irraggiamento – scenario 2

Tabella 22: irraggiamento – scenario 2

Tempo	Irraggiamento [kW/m ²]
0s	
120s	



6.1.2.5. Curva Temperatura-Tempo

La temperatura massima dei gas registrata in prossimità della colonna in acciaio (riportato in riquadro nero) alla quota 1m dal piano di calpestio è di circa 370 °C. In Figura 36 è riportato la posizione del sensore virtuale attraverso il quale viene registrata la temperatura all'interno della simulazione. In giallo la posizione dove è posizionato il sensore.

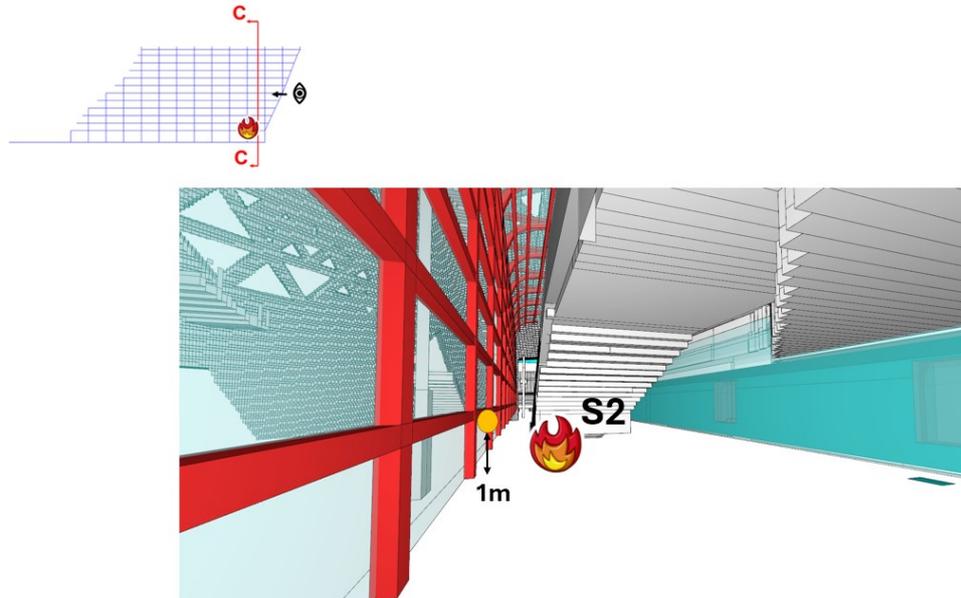


Figura 42: posizione del sensore (scenario 1)

In Figura 37 si riporta l'andamento della temperatura-tempo.

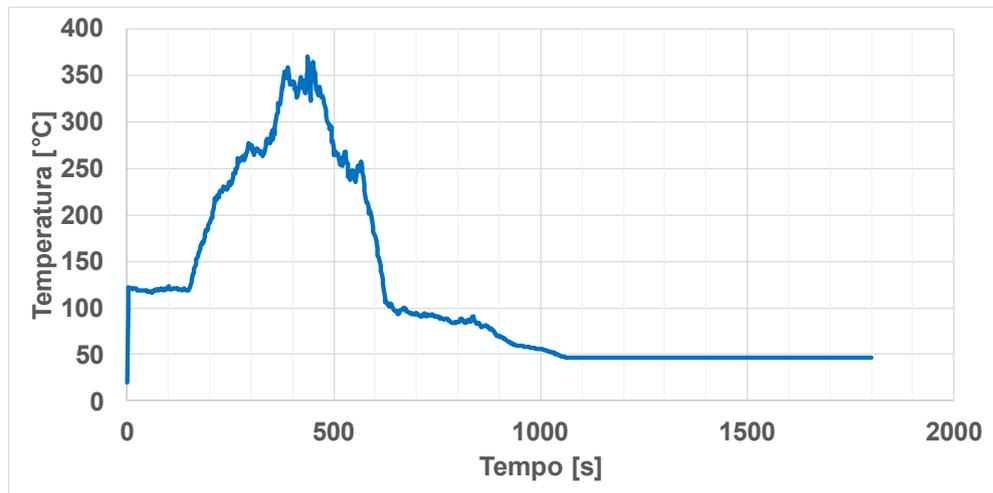


Figura 43: Curva temperatura-tempo

6.2. Risultati analisi FEM

In seguito, si riportano i risultati dell'analisi FEM studiato per lo scenario di incendio che comporta un'azione termica superiore.

6.2.1. Analisi termica

A partire dalle curve temperatura-tempo dei gas in prossimità della struttura determinati attraverso lo studio CFD si può valutare l'andamento della temperatura nel solido attraverso lo studio agli elementi finiti FEM.

Considerando che l'effetto dell'incendio è limitato alla zona di incendio, è stato considerato cautelativamente di adottare la curva temperatura-tempo massima determinata agli elementi strutturali nel raggio d'azione dell'incendio (curva 1 in Figura 44), al resto della struttura è stato considerato la temperatura tempo determinato in copertura (curva 2 in Figura 44).

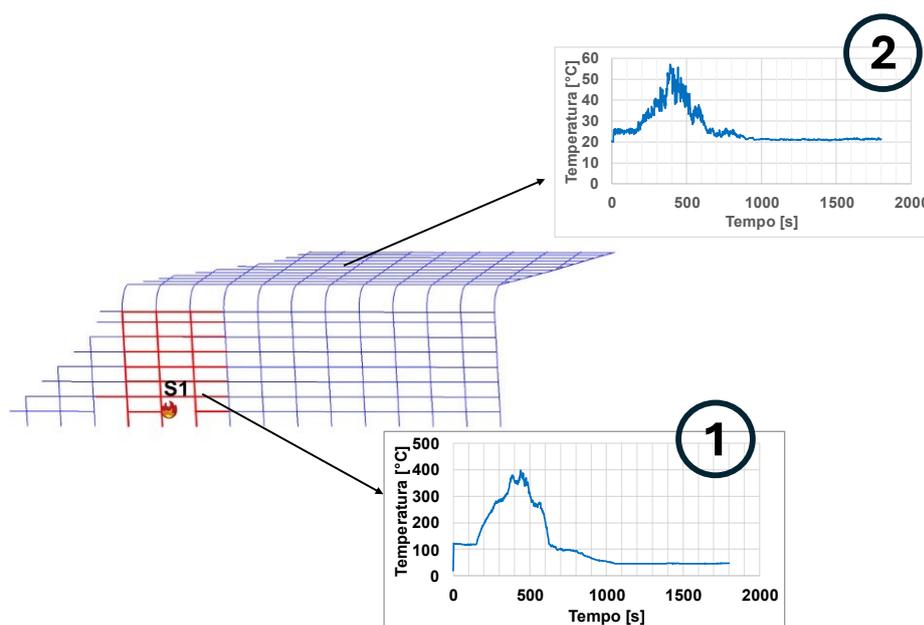
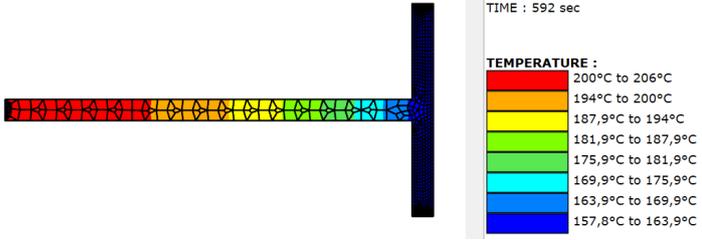
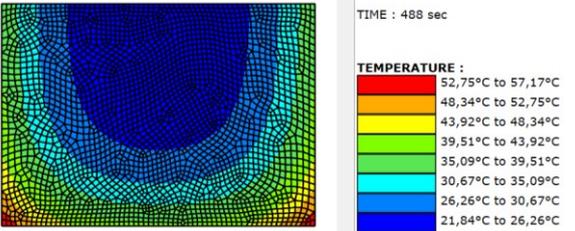
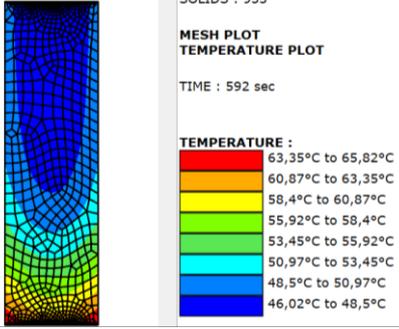
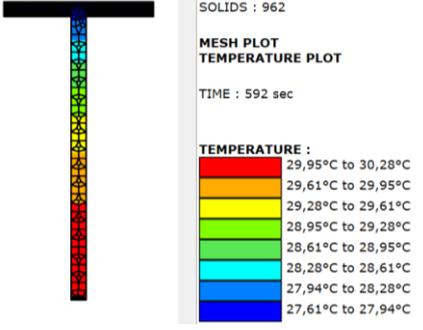
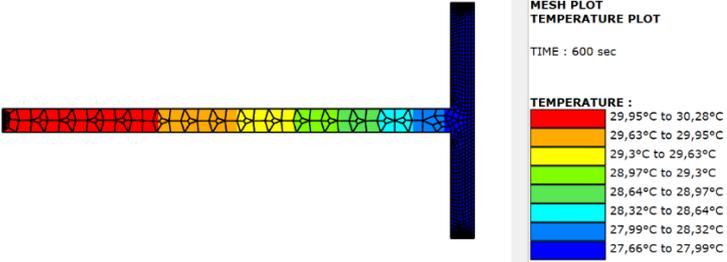
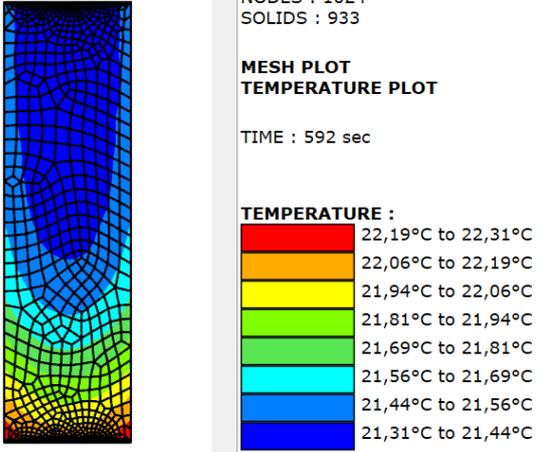


Figura 44: esposizione al fuoco della struttura

In Tabella 23 è riportato l'andamento di temperatura per ciascun elemento strutturale vicino all'incendio e distante da esso. I plot di temperatura sono presi all'istante in cui si raggiunge la massima temperatura nell'elemento.

Tabella 23: andamento di temperatura nel solido

Zona	Elemento strutturale	Andamento di temperatura
Incendio	2	 <p> NODES : 1106 SOLIDS : 962 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 592 sec TEMPERATURE : 200°C to 206°C 194°C to 200°C 187,9°C to 194°C 181,9°C to 187,9°C 175,9°C to 181,9°C 169,9°C to 175,9°C 163,9°C to 169,9°C 157,8°C to 163,9°C </p>
	3	 <p> NODES : 2820 SOLIDS : 2723 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 488 sec TEMPERATURE : 52,75°C to 57,17°C 48,34°C to 52,75°C 43,92°C to 48,34°C 39,51°C to 43,92°C 35,09°C to 39,51°C 30,67°C to 35,09°C 26,26°C to 30,67°C 21,84°C to 26,26°C </p>
	4	 <p> NODES : 1024 SOLIDS : 933 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 592 sec TEMPERATURE : 63,35°C to 65,82°C 60,87°C to 63,35°C 58,4°C to 60,87°C 55,92°C to 58,4°C 53,45°C to 55,92°C 50,97°C to 53,45°C 48,5°C to 50,97°C 46,02°C to 48,5°C </p>
Distante dall'incendio	1	 <p> NODES : 1106 SOLIDS : 962 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 592 sec TEMPERATURE : 29,95°C to 30,28°C 29,61°C to 29,95°C 29,28°C to 29,61°C 28,95°C to 29,28°C 28,61°C to 28,95°C 28,28°C to 28,61°C 27,94°C to 28,28°C 27,61°C to 27,94°C </p>

Zona	Elemento strutturale	Andamento di temperatura
Distante dall'incendio	2	 <p> NODES : 1106 SOLIDS : 962 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 600 sec TEMPERATURE : 29,95°C to 30,28°C 29,63°C to 29,95°C 29,3°C to 29,63°C 28,97°C to 29,3°C 28,64°C to 28,97°C 28,32°C to 28,64°C 27,99°C to 28,32°C 27,66°C to 27,99°C </p>
	4	 <p> NODES : 1024 SOLIDS : 933 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 592 sec TEMPERATURE : 22,19°C to 22,31°C 22,06°C to 22,19°C 21,94°C to 22,06°C 21,81°C to 21,94°C 21,69°C to 21,81°C 21,56°C to 21,69°C 21,44°C to 21,56°C 21,31°C to 21,44°C </p>

6.2.2. Analisi strutturale

6.2.2.1. Condizione di carico e vincolo

La struttura è soggetta a una condizione di carico statico in combinazione alla sollecitazione strutturale.

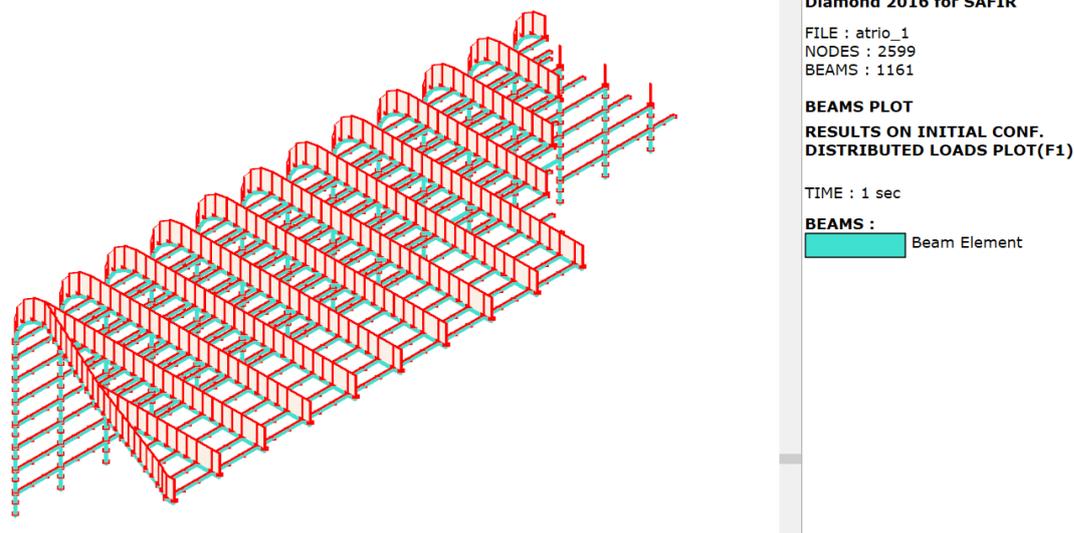


Figura 45: Sollecitazione statica

In Figura 46 si riporta la condizione di vincolo esterno della struttura.

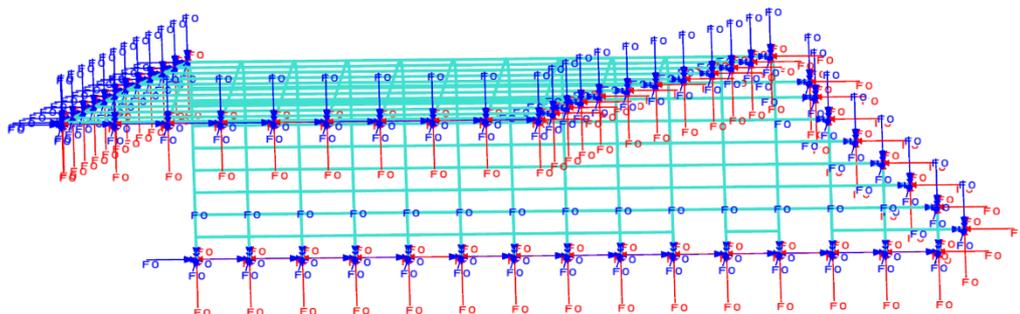
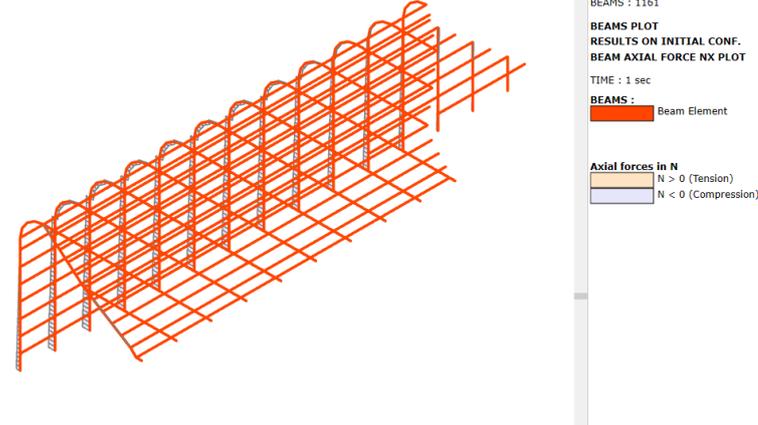
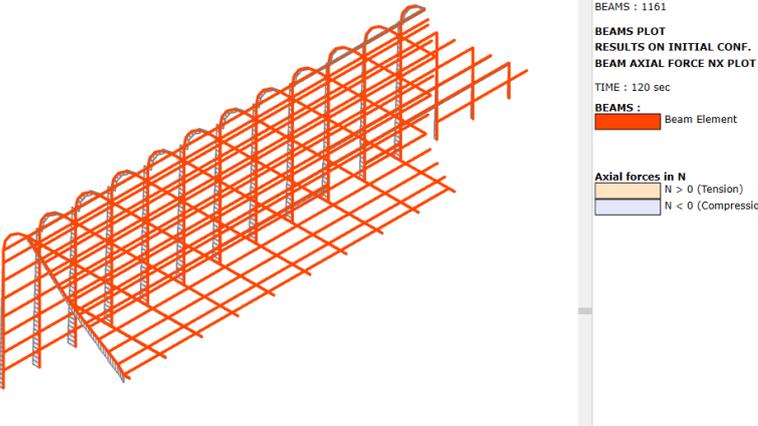


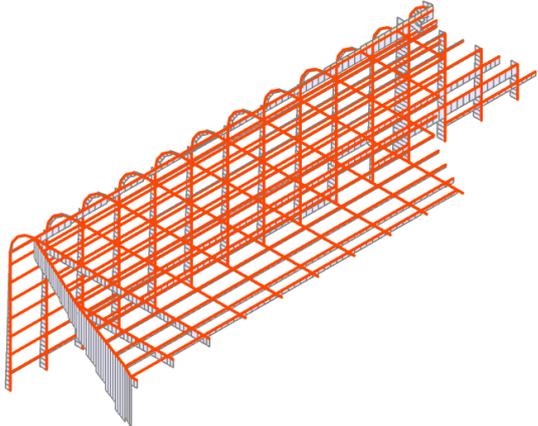
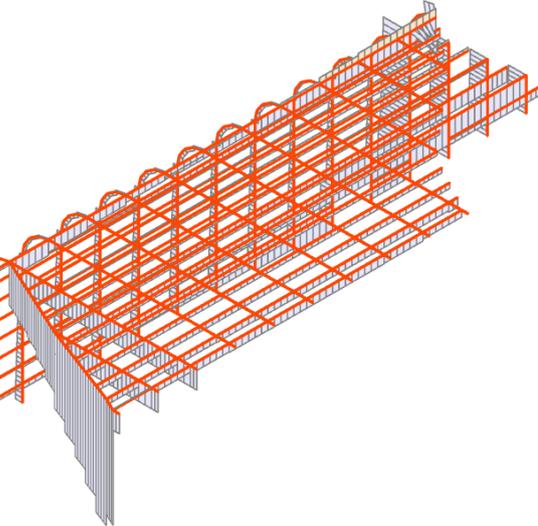
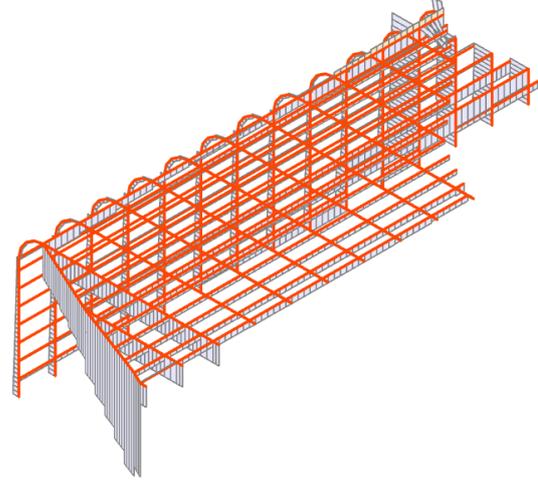
Figura 46: condizioni di vincolo esterno

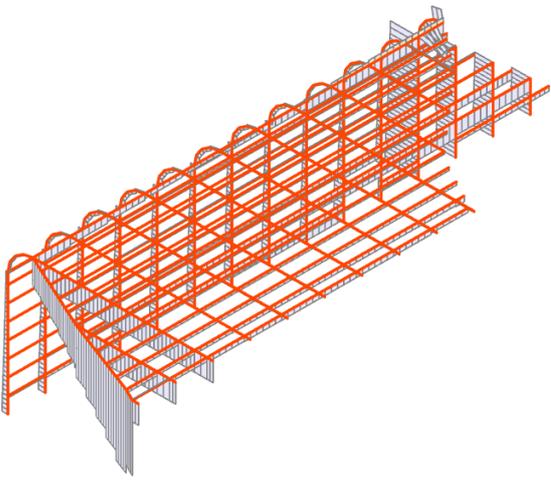
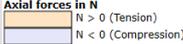
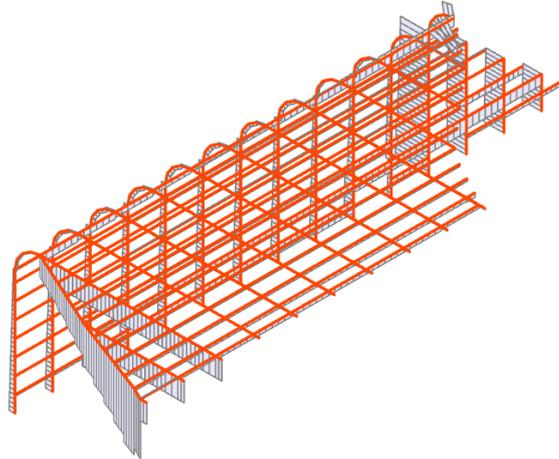
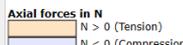
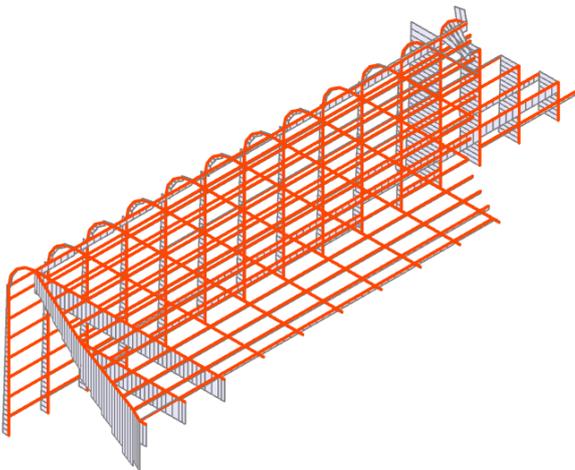
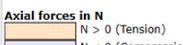
6.2.2.2. Sforzo Normale

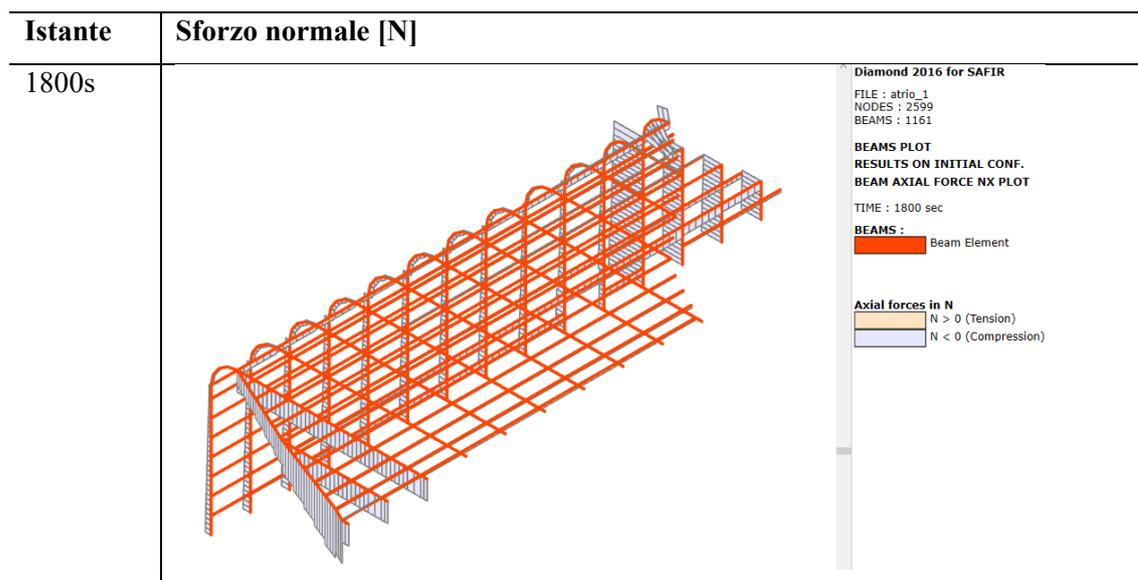
In Tabella 24 sono riportati i risultati dello sforzo normale negli istanti significativi della simulazione.

Tabella 24: analisi strutturale – sforzo normale

Istante	Sforzo normale [N]
0s	
120s	

Istante	Sforzo normale [N]
360s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BEAM AXIAL FORCE NX PLOT</p> <p>TIME : 360 sec</p> <p>BEAMS : Beam Element</p> <p>Axial forces in N N > 0 (Tension) N < 0 (Compression)</p>
600s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BEAM AXIAL FORCE NX PLOT</p> <p>TIME : 600 sec</p> <p>BEAMS : Beam Element</p> <p>Axial forces in N N > 0 (Tension) N < 0 (Compression)</p>
840s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BEAM AXIAL FORCE NX PLOT</p> <p>TIME : 840 sec</p> <p>BEAMS : Beam Element</p> <p>Axial forces in N N > 0 (Tension) N < 0 (Compression)</p>

Istante	Sforzo normale [N]
1080s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BEAM AXIAL FORCE NX PLOT</p> <p>TIME : 1080 sec</p> <p>BEAMS :  Beam Element</p> <p>Axial forces in N  <ul style="list-style-type: none">  N > 0 (Tension)  N < 0 (Compression) </p>
1320s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BEAM AXIAL FORCE NX PLOT</p> <p>TIME : 1320 sec</p> <p>BEAMS :  Beam Element</p> <p>Axial forces in N  <ul style="list-style-type: none">  N > 0 (Tension)  N < 0 (Compression) </p>
1560s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BEAM AXIAL FORCE NX PLOT</p> <p>TIME : 1560 sec</p> <p>BEAMS :  Beam Element</p> <p>Axial forces in N  <ul style="list-style-type: none">  N > 0 (Tension)  N < 0 (Compression) </p>



In Figura 47 è riportata la trave maggiormente sollecitata a sforzo assiale.

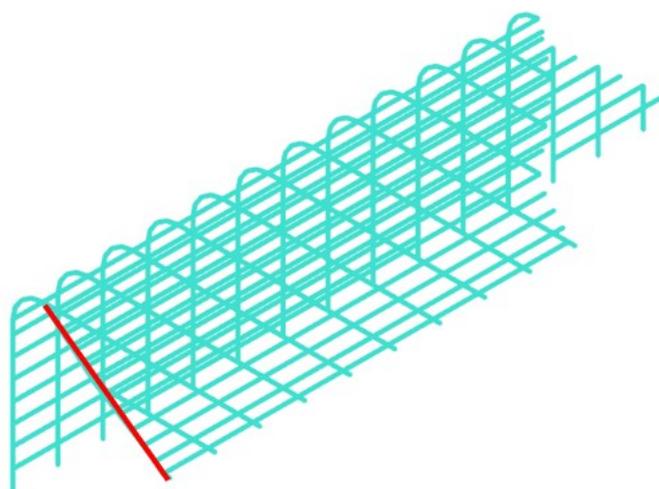
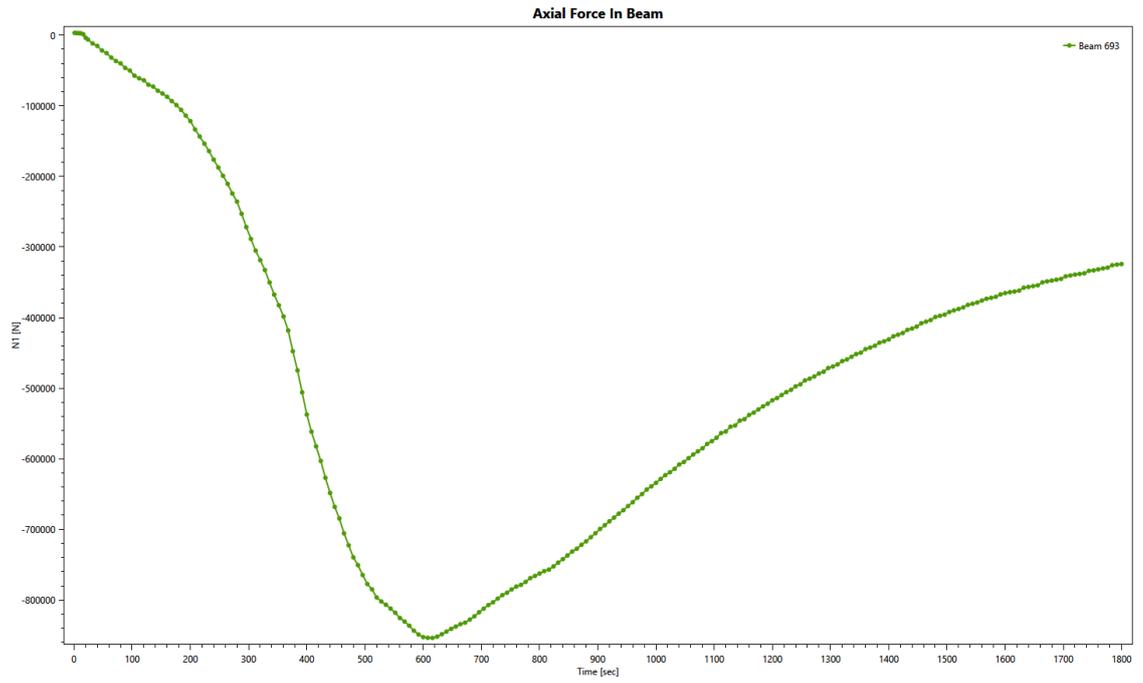


Figura 47: trave sollecitata a sforzo normale maggiore

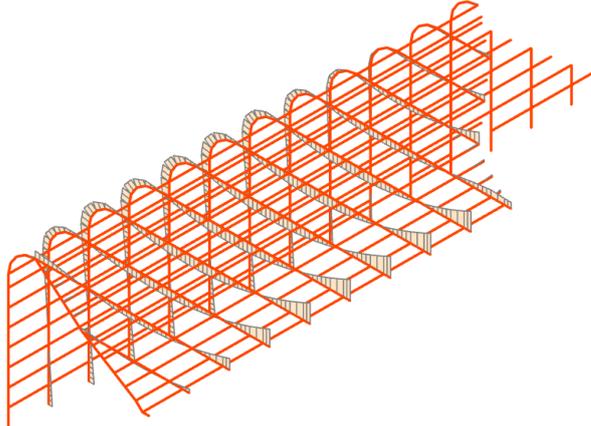
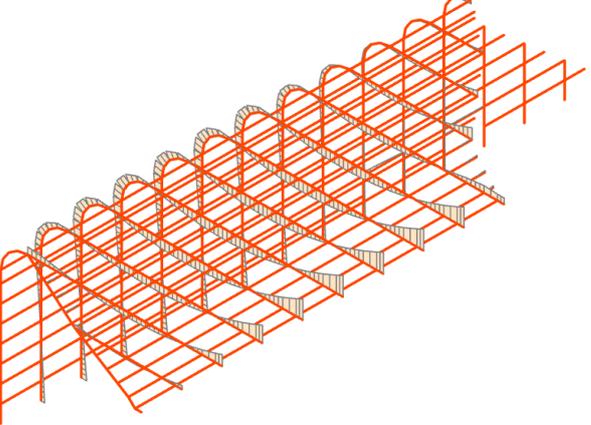
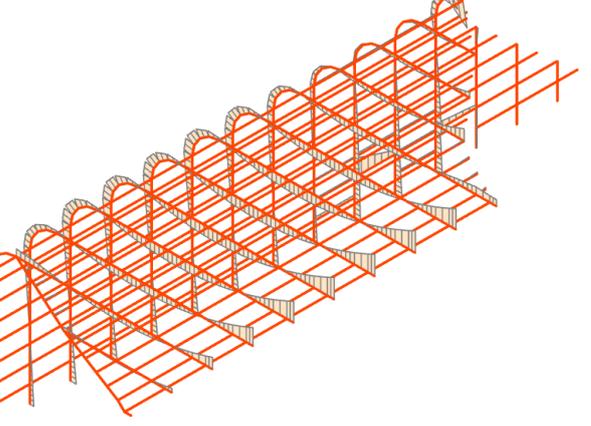
Lo sforzo normale presenta la seguente variazione nel tempo per effetto dell'incendio.

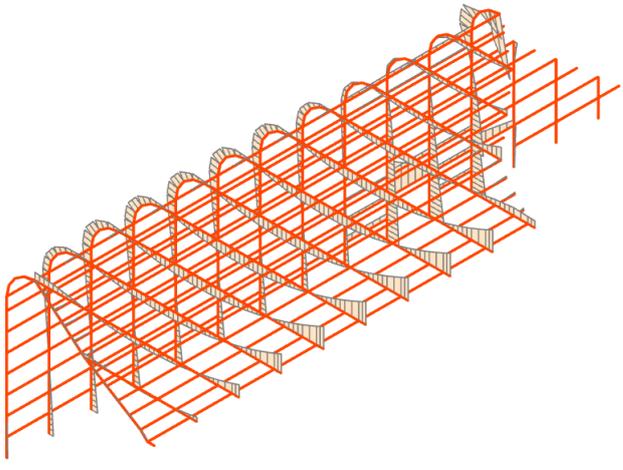
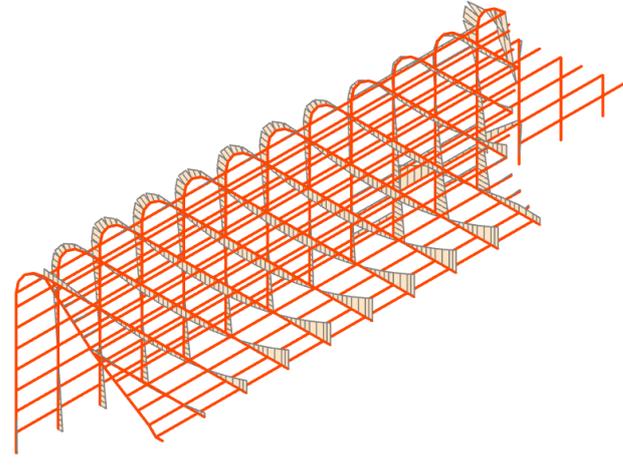
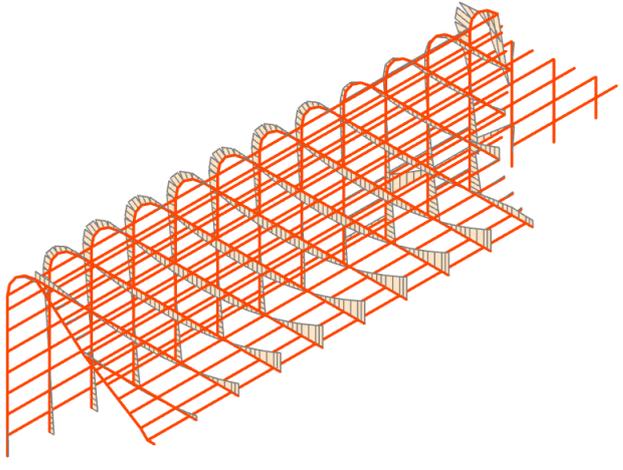


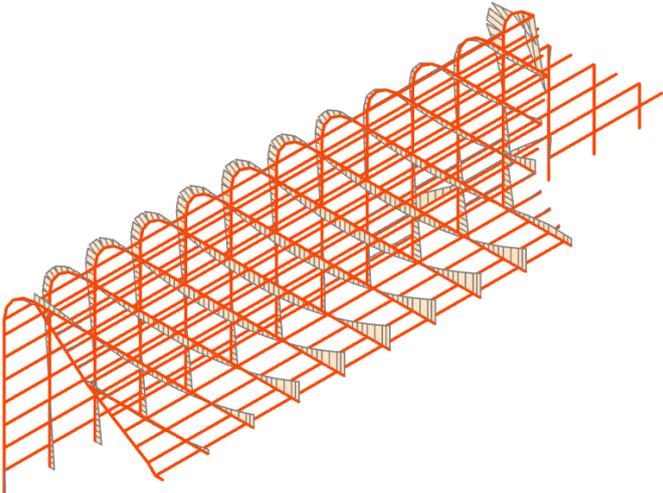
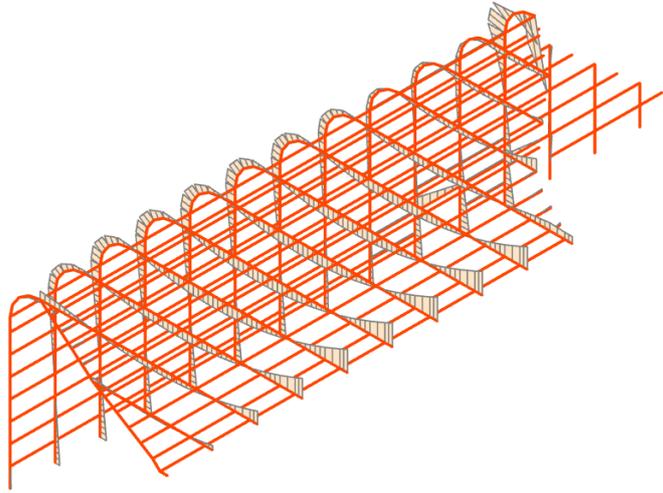
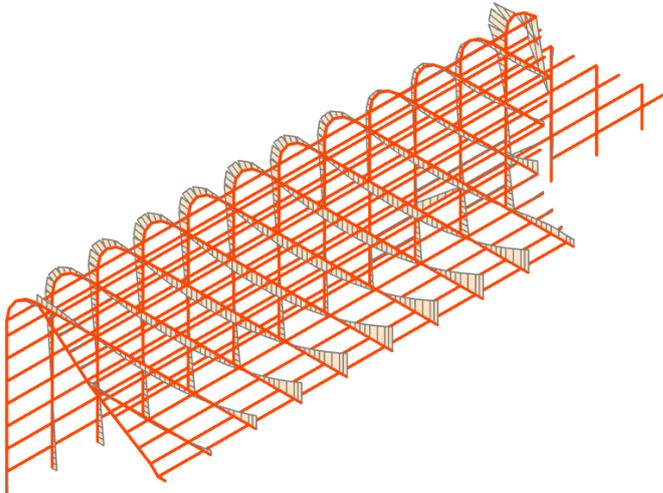
6.2.2.3. Momento flettente

In Tabella 25 sono riportati i risultati del momento flettente negli istanti significativi della simulazione.

Tabella 25: analisi strutturale – Momento flettente

Istante	Momento flettente M_z [Nm]
0s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT TIME : 1 sec BEAMS : █ Beam Element Bending moments in N.m</p>
120s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT TIME : 120 sec BEAMS : █ Beam Element Bending moments in N.m</p>
360s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT TIME : 360 sec BEAMS : █ Beam Element Bending moments in N.m</p>

Istante	Momento flettente M_z [Nm]
600s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT TIME : 600 sec BEAMS : Beam Element Bending moments in N.m</p>
840s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT TIME : 840 sec BEAMS : Beam Element Bending moments in N.m</p>
1080s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT TIME : 1080 sec BEAMS : Beam Element Bending moments in N.m</p>

Istante	Momento flettente Mz [Nm]
1320s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT</p> <p>TIME : 1320 sec</p> <p>BEAMS : </p> <p>Bending moments in N.m</p>
1560s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT</p> <p>TIME : 1560 sec</p> <p>BEAMS : </p> <p>Bending moments in N.m</p>
1800s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. BENDING MOMENT MZ PLOT</p> <p>TIME : 1800 sec</p> <p>BEAMS : </p> <p>Bending moments in N.m</p>

In Figura 48 è riportata la trave maggiormente sollecitata a taglio.

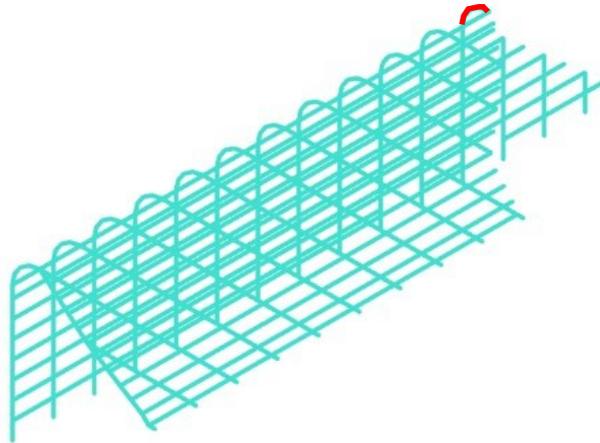
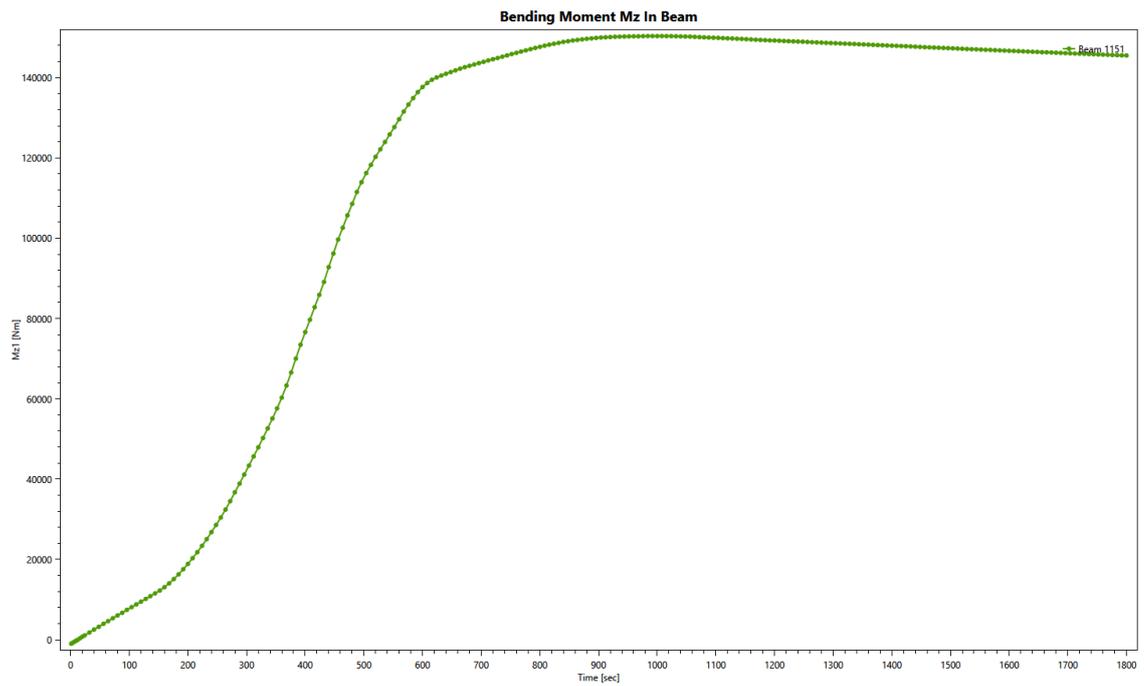


Figura 48: trave sollecitata a sforzo normale maggiore

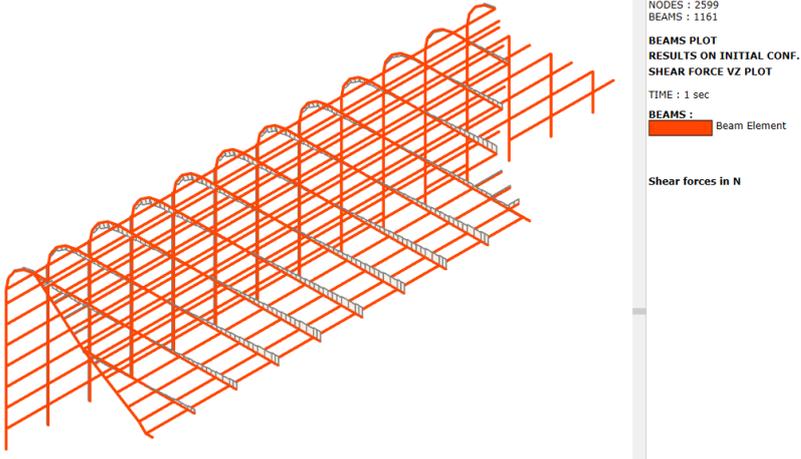
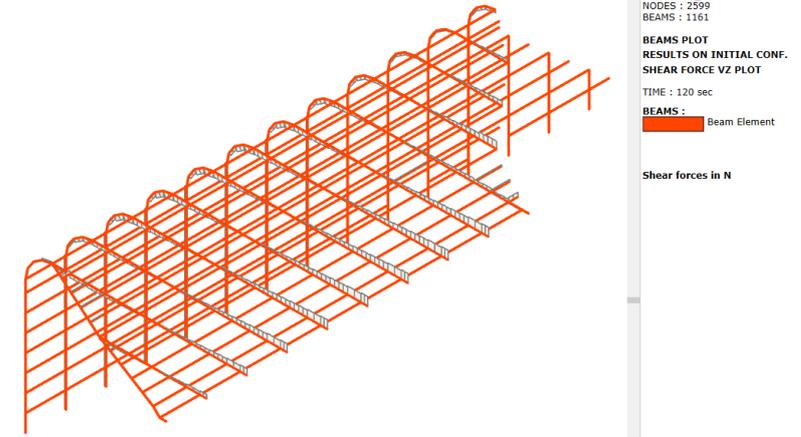
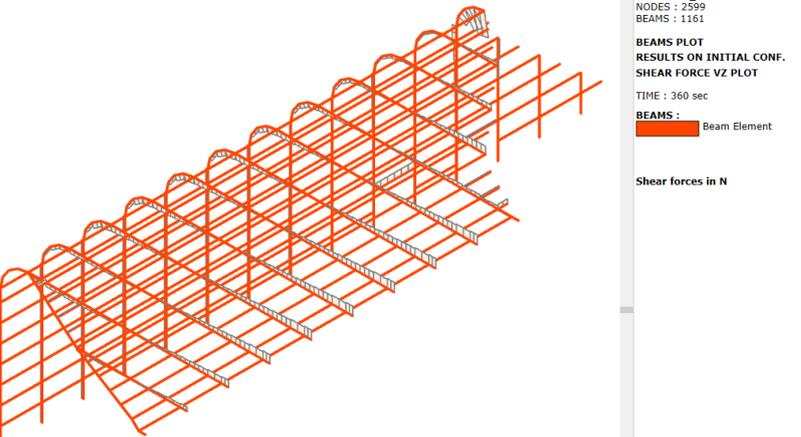
Il taglio presenta la seguente variazione nel tempo per effetto dell'incendio.

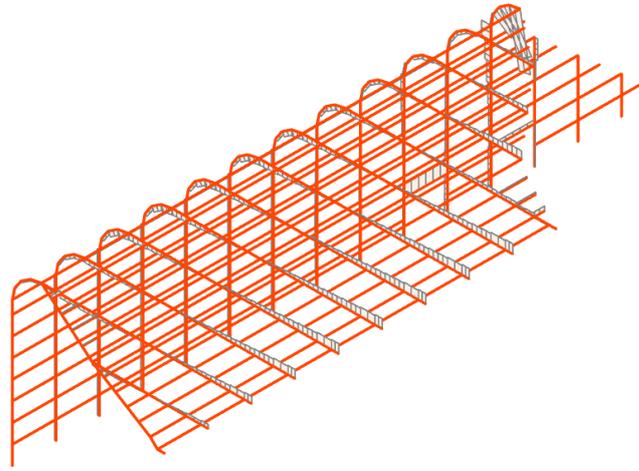
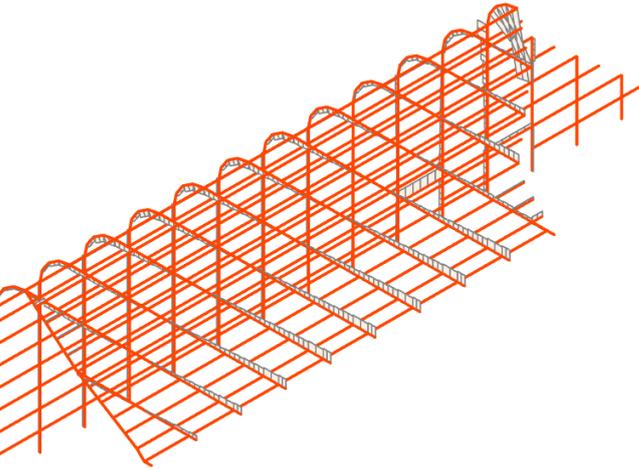
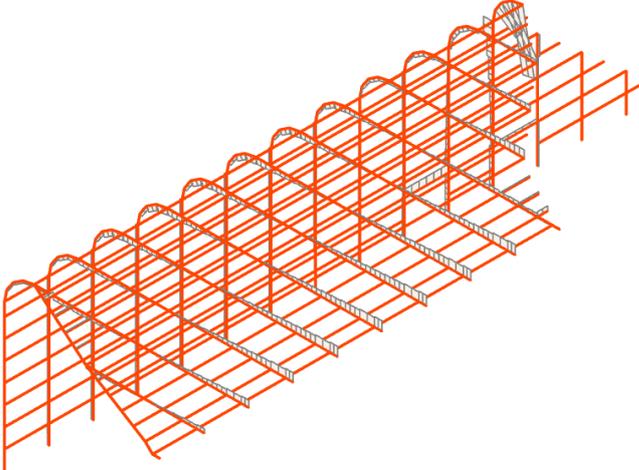


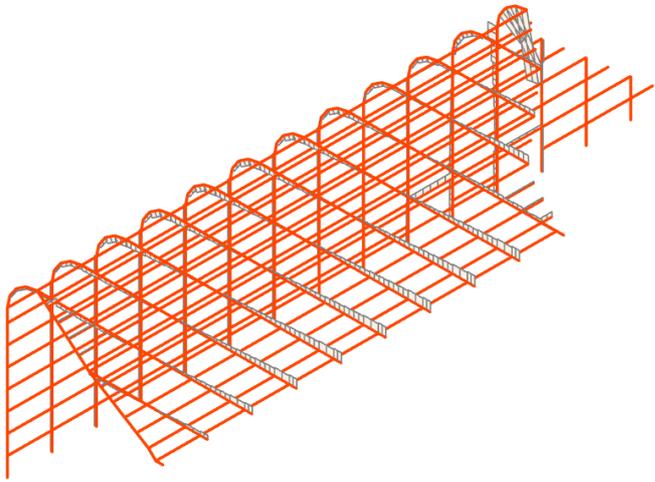
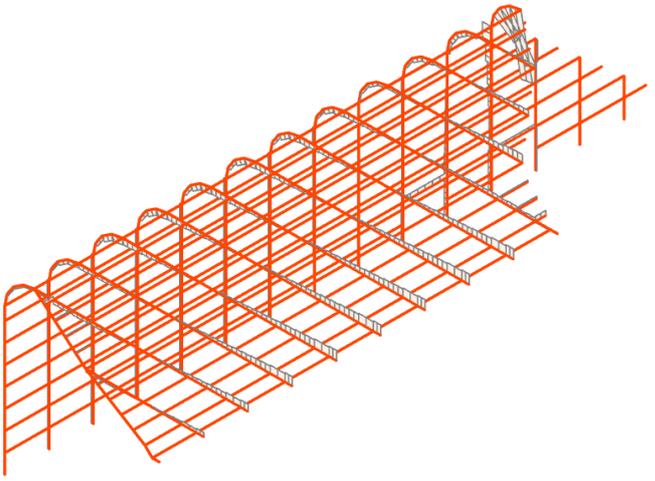
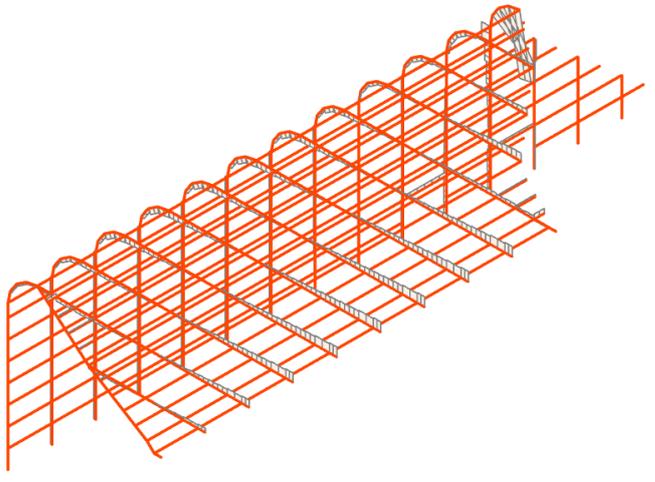
6.2.2.4. Taglio

In Tabella 26 Tabella 24 sono riportati i risultati del taglio negli istanti significativi della simulazione.

Tabella 26: analisi strutturale – Taglio

Istante	Taglio [N]
0s	
120s	
360s	

Istante	Taglio [N]
600s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. SHEAR FORCE VZ PLOT</p> <p>TIME : 600 sec</p> <p>BEAMS :  Beam Element</p> <p>Shear forces in N</p>
840s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. SHEAR FORCE VZ PLOT</p> <p>TIME : 840 sec</p> <p>BEAMS :  Beam Element</p> <p>Shear forces in N</p>
1080s	 <p>Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161</p> <p>BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. SHEAR FORCE VZ PLOT</p> <p>TIME : 1080 sec</p> <p>BEAMS :  Beam Element</p> <p>Shear forces in N</p>

Istante	Taglio [N]
1320s	 <p data-bbox="1117 277 1402 824"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. SHEAR FORCE VZ PLOT TIME : 1320 sec BEAMS : █ Beam Element Shear forces in N </p>
1560s	 <p data-bbox="1117 824 1402 1370"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. SHEAR FORCE VZ PLOT TIME : 1560 sec BEAMS : █ Beam Element Shear forces in N </p>
1800s	 <p data-bbox="1117 1370 1402 1904"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT RESULTS ON INITIAL CONF. SHEAR FORCE VZ PLOT TIME : 1800 sec BEAMS : █ Beam Element Shear forces in N </p>

In Figura 48 è riportata la trave maggiormente sollecitata a taglio.

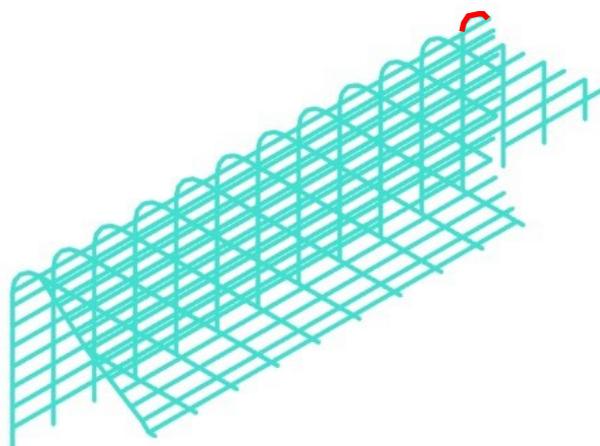
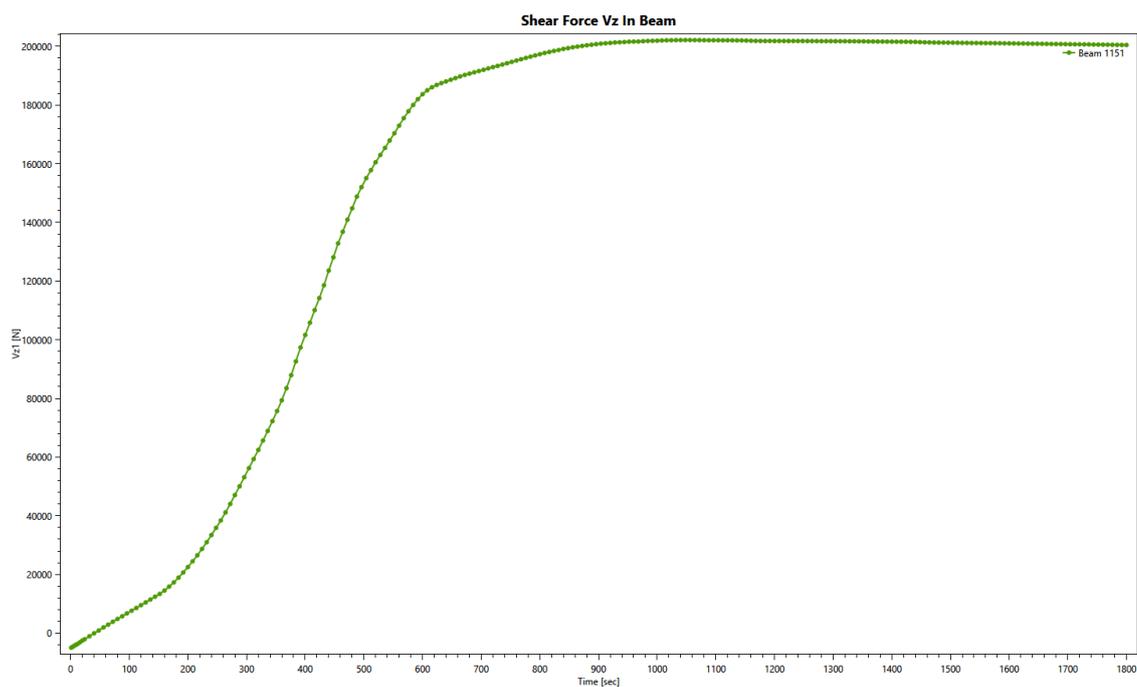


Figura 49: trave sollecitata a sforzo normale maggiore

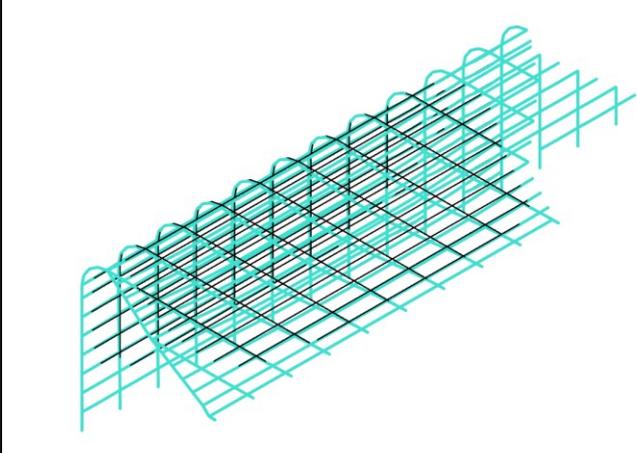
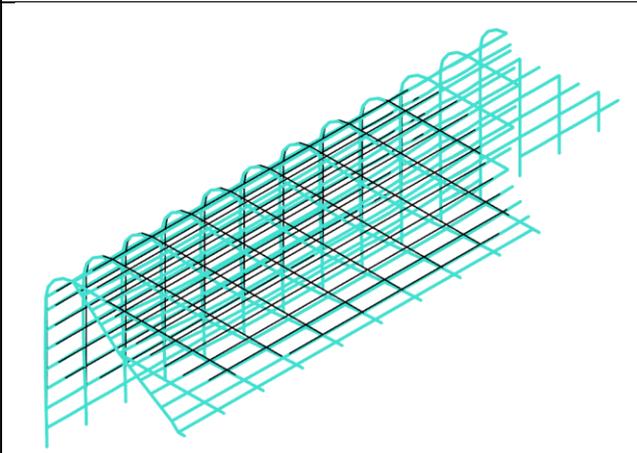
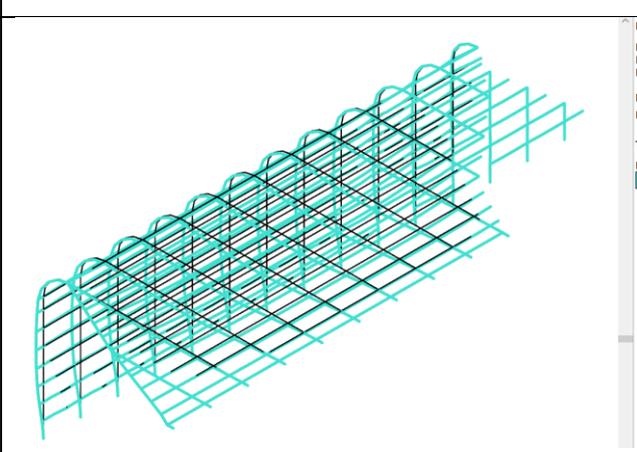
Il taglio presenta la seguente variazione nel tempo per effetto dell'incendio.

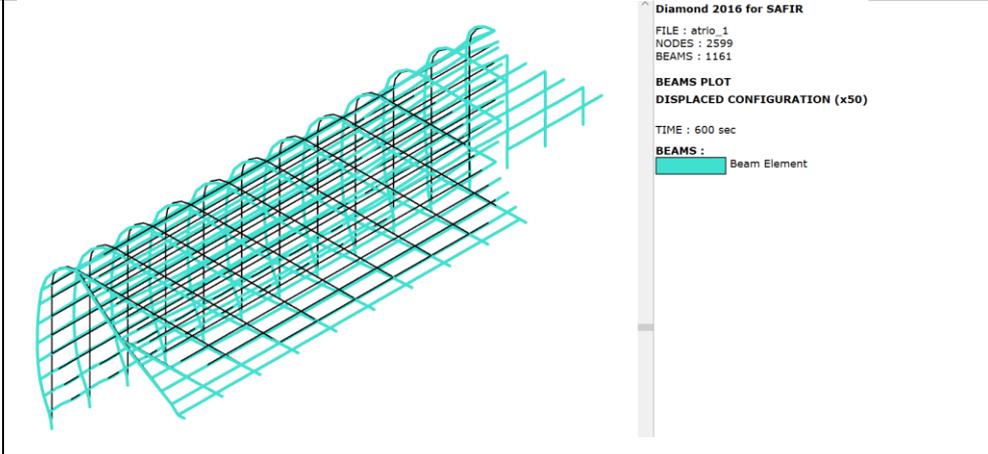
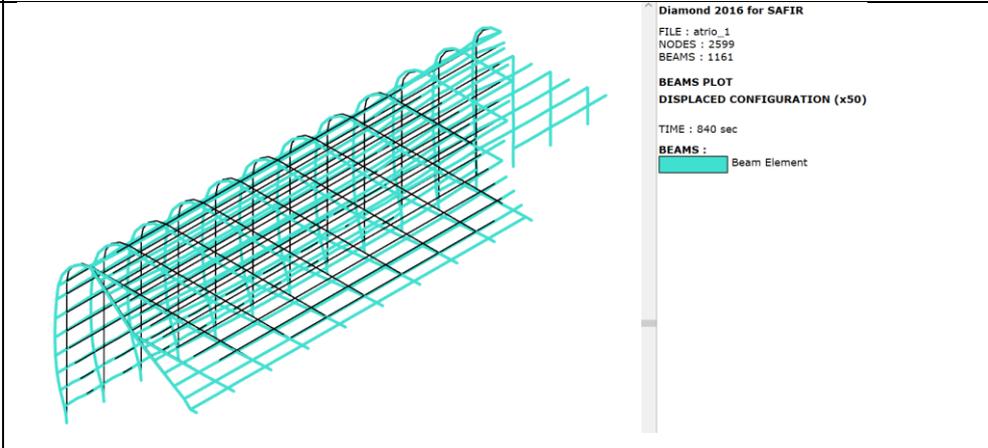
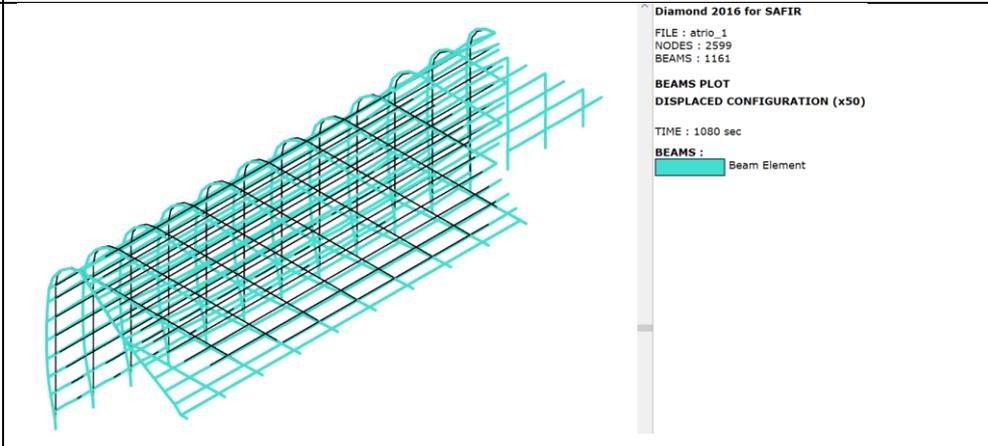


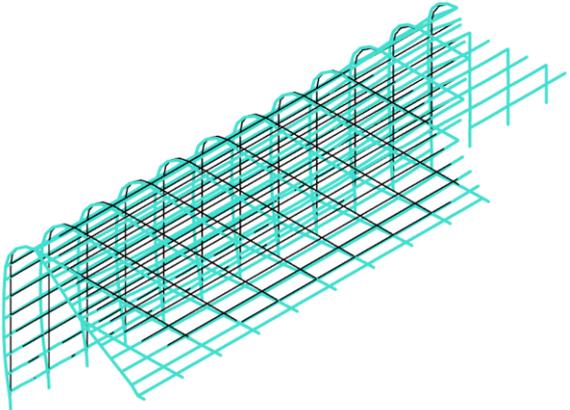
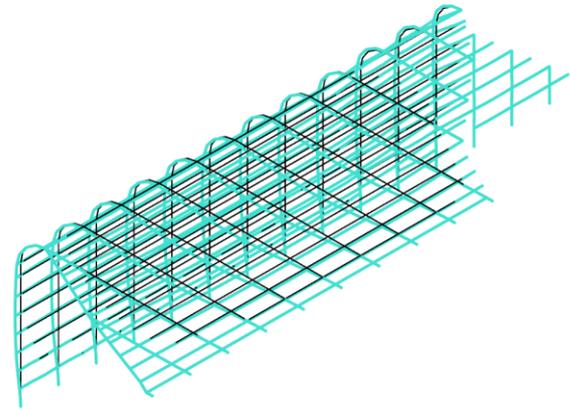
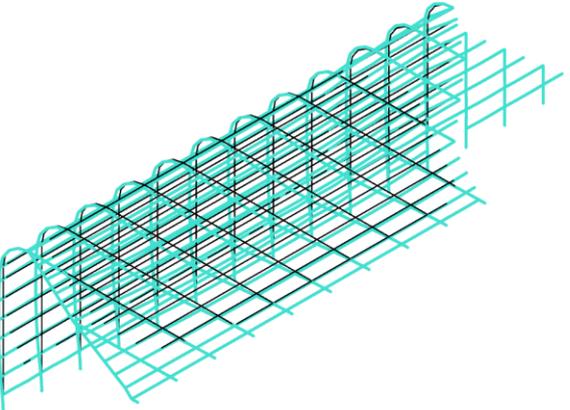
6.2.2.5. Deformata strutturale

In Tabella 27 sono riportati i plot di deformata strutturale negli istanti significativi della simulazione. Per un miglior effetto visivo è stato considerato un fattore scala pari a 50.

Tabella 27: analisi strutturale – Deformata

Istante	Deformata [m]
0s	 <p data-bbox="1061 528 1394 981"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT DISPLACED CONFIGURATION (x50) TIME : 1 sec BEAMS : Beam Element </p>
120s	 <p data-bbox="1061 987 1394 1440"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT DISPLACED CONFIGURATION (x50) TIME : 120 sec BEAMS : Beam Element </p>
360s	 <p data-bbox="1061 1447 1394 1899"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT DISPLACED CONFIGURATION (x50) TIME : 360 sec BEAMS : Beam Element </p>

Istante	Deformata [m]
600s	
840s	
1080s	

Istante	Deformata [m]
1320s	 <p data-bbox="1075 282 1402 734"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT DISPLACED CONFIGURATION (x50) TIME : 1320 sec BEAMS : Beam Element </p>
1560s	 <p data-bbox="1075 741 1402 1193"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT DISPLACED CONFIGURATION (x50) TIME : 1560 sec BEAMS : Beam Element </p>
1800s	 <p data-bbox="1075 1200 1402 1655"> Diamond 2016 for SAFIR FILE : atrio_1 NODES : 2599 BEAMS : 1161 BEAMS PLOT DISPLACED CONFIGURATION (x50) TIME : 1800 sec BEAMS : Beam Element </p>

In Figura 50 si riportano i nodi dove sono determinate gli spostamenti massimi.

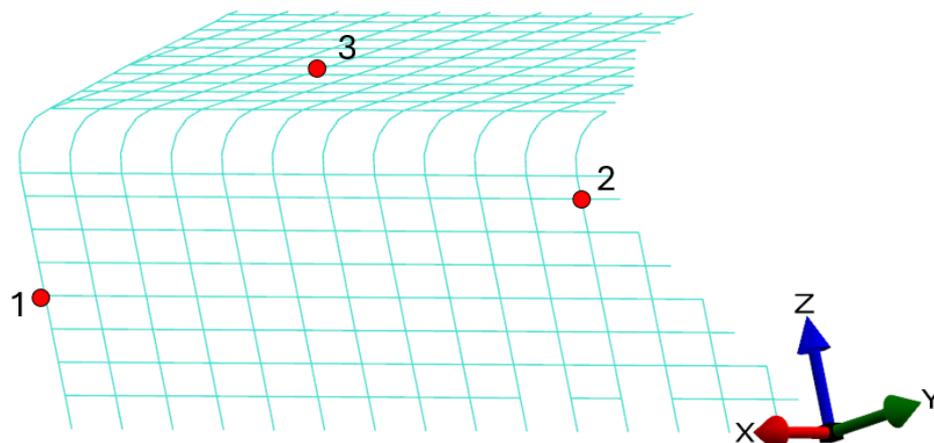


Figura 50: punti con spostamento maggiore

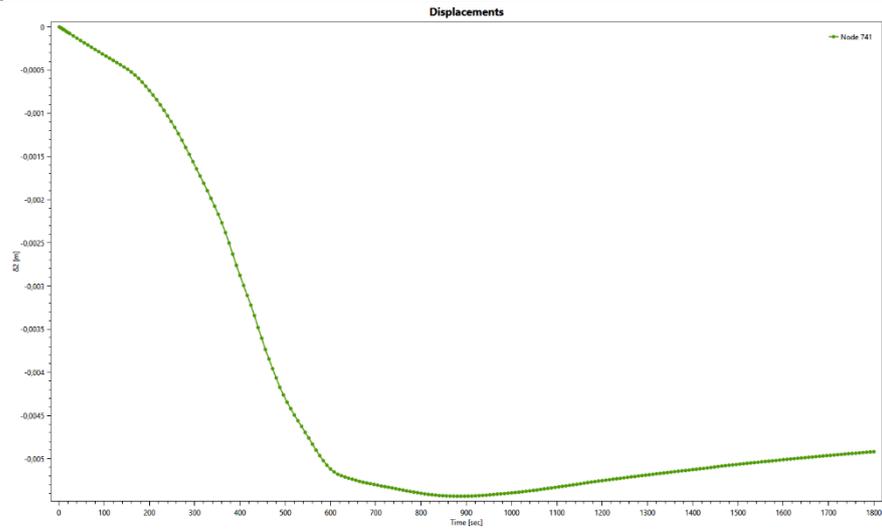
In Tabella 28 è riportato lo spostamento nel tempo di ciascuno punto solo nella direzione che presentano lo spostamento massimo.

Tabella 28: spostamento nodale

Punto	Direzione	Spostamento
1	X	<p>Spostamento massimo di 2.4cm.</p>

2

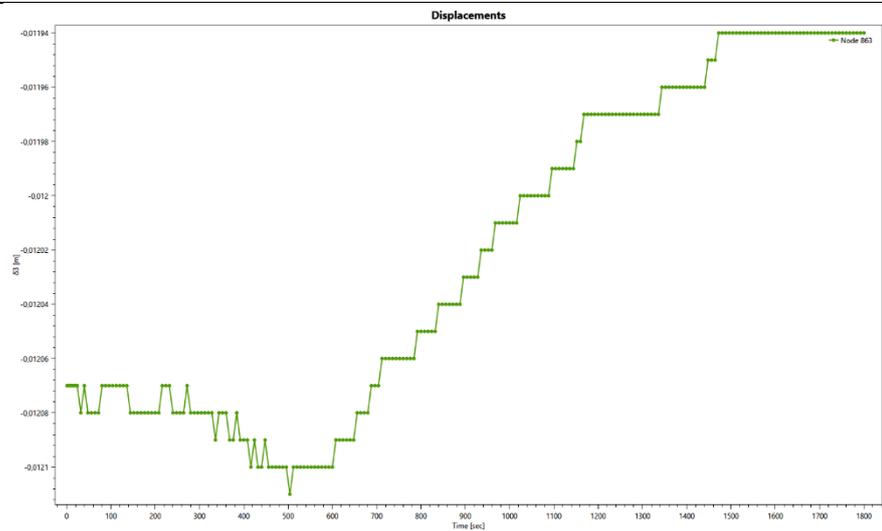
y



Spostamento massimo di 0.55cm.

3

z



Il valore dello spostamento lungo l'asse z rimane pressoché costante al valore di 1.2cm circa.

6.2.3. Verifica strutturali a caldo

L'analisi svolta mediante il software agli elementi finiti non ha individuato un eventuale collasso della struttura. Pertanto, per completezza del calcolo si procede ad una verifica strutturale partendo dai valori di sollecitazione massime determinati dal software.

Dall'analisi del transitorio termico sono stati individuati le travi sollecitate maggiormente.

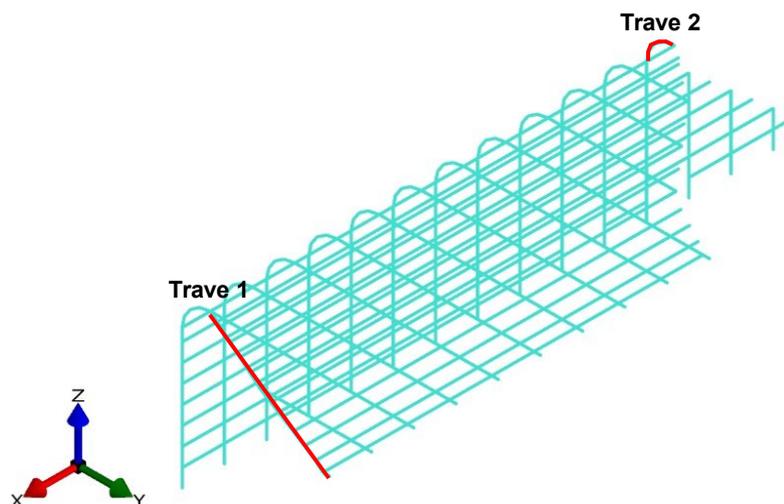


Figura 51: travi maggiormente sollecitate

In Tabella 29 si riporta le sollecitazioni significative definite dal software di calcolo agli elementi strutturali. In rosso sono riportate le sollecitazioni massime sulla struttura.

Tabella 29: sollecitazioni massime

Trave	N	V _y	V _z	M _y	M _z
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN·m]	[kN·m]
1	854 (compressione)	10	1.024	5.2	2.08
2	86 (trazione)	4	202	1.24	150 (tende le fibre inferiori)

6.2.3.1. Classificazione della sezione

La classe della sezione è determinata considerando il comportamento a caldo del materiale considerando il seguente valore di ε :

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Tabella 30: Classe della sezione

Trave	Tipologia di trave	Classe
1	Rettangolare	1
2		1

6.2.3.2. Comportamento a caldo dei materiali

Tabella 31: Temperatura massima dell'elemento strutturale

Trave	Tipologia di trave	Temperatura massima [°C]
1	Rettangolare	22
2		66

In è riportato l'andamento dei coefficienti di riduzione di snervamento, limite di proporzionalità e modulo elastico della trave al variare della temperatura del materiale. In rosso, la temperatura massima in cui l'elemento strutturale è soggetto.

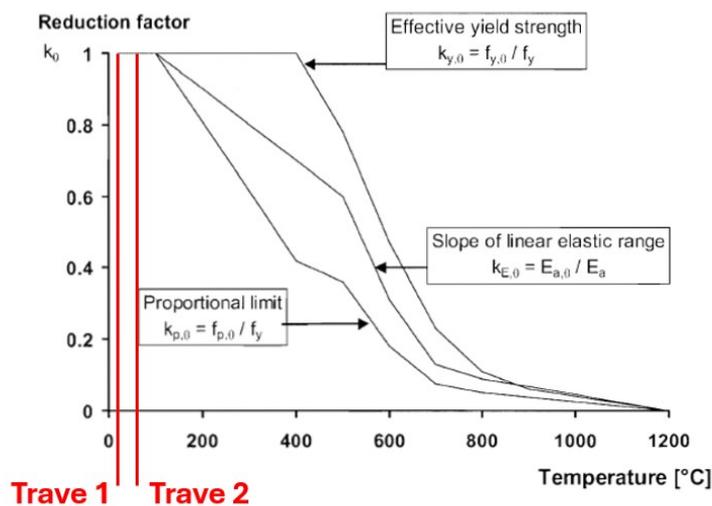


Figura 52: coefficiente di riduzione – trave 1 e 2

Pertanto, entrambe le travi presentano le seguenti coefficienti di riduzione (vedi **Tabella 32**).

Tabella 32: Coefficienti di riduzione dell'acciaio

Coefficiente	Descrizione	Valore
$k_{y,\theta}$	Coefficiente di riduzione della tensione di snervamento	1.000
$k_{p,\theta}$	Coefficiente di riduzione della tensione di proporzionalità	1.000
$k_{E,\theta}$	Coefficiente di riduzione del modulo di elasticità	1.000

6.2.3.3. Verifica a taglio

La verifica a taglio è soddisfatta se:

$$V_{Ed} < V_{fi,t,Rd}$$

Il valore della resistenza a taglio è determinato in accordo con la norma [27].

Per la determinazione del taglio resistente è stato tenuto in conto l'intera area della sezione considerando che l'anima corrisponde a tutta la sezione (entrambe le travi hanno la stessa dimensione).

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} V_{Rd} \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right]$$

Tabella 33: verifica a taglio

Parametro		Valore	
		Trave 1	Trave 2
$k_{y,\theta,web}$	[-]	1	
V_{Rd}	kN	4520	
$\gamma_{M,0}$	[-]	1.05	
$\gamma_{M,fi}$	[-]	1	
$V_{fi,t,Rd}$	kN	4748	
V_{Ed}	kN	10	202
Verifica	[-]	Soddisfatta	Soddisfatta

²⁷ EN 1993-1-2 capitolo 4.2.3.3.

6.2.3.4. Verifica al momento flettente

La verifica a momento flettente è soddisfatta se:

$$M_{Ed} < M_{fi,\theta,Rd}$$

Il valore della resistenza al momento flettente è determinato in accordo alla norma [28].

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right]$$

Dato che il valore del taglio agente è inferiore a 50% del valore del taglio resistente allora il fattore di riduzione della tensione per effetto del taglio (ρ) è nullo.

Tabella 34: Verifica al momento flettente

Parametro		Valore	
		Trave 1	Trave 2
$k_{y,\theta}$	[-]	1	
M_{Rd}	kNm	456	
$\gamma_{M,0}$	[-]	1.05	
$\gamma_{M,fi}$	[-]	1	
$M_{fi,t,Rd}$	kNm	684	
M_{Ed}	kNm	2.08	150
Verifica	[-]	Soddisfatta	Soddisfatta

²⁸ EN 1993-1-2 capitolo 4.2.3.3

6.2.3.5. Verifica a sforzo normale (compressione)

La verifica a momento flettente è soddisfatta se:

$$N_{Ed} < N_{b,fi,t,Rd}$$

Il valore della resistenza al momento flettente è determinato in accordo alla norma [29].

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Tabella 35: Verifica a sforzo normale di compressione

Parametro		Valore
		Trave 1
$k_{y,\theta}$	[-]	1
χ_{fi}	[-]	0.164
$\gamma_{M,fi}$	[-]	1
$N_{b,fi,t,Rd}$	kNm	1350
N_{Ed}	kNm	150
Verifica	[-]	Soddisfatta

²⁹ EN 1993-1-2 capitolo 4.2.3.2

7. CONCLUSIONI

L'analisi prestazionale e le verifiche strutturali mostrano come i valori di temperatura che si possono registrare in caso di incendio non sono tali da generare un cimento termico sulla struttura tale da pregiudicarne la sua capacità portante.

La struttura resiste all'azione combinata dei carichi statici e l'azione termica per l'intera durata del transitorio termico senza l'instaurarsi di fenomeni di instabilità locale e cedimenti tali da comportare il collasso strutturale.

Attraverso l'utilizzo del software `cf_d_fem_v0` è stato possibile creare un collegamento tra le due simulazioni CFD e FEM, in grado di velocizzare il processo di posizionamento di posizionamento dei sensori di temperatura e convertire i file di output della simulazione CFD in file di input leggibili e compatibili per la simulazione FEM.

Appendice: Analisi di sensitività della mesh

Analisi CFD

Al fine di garantire l'indipendenza dei risultati dalla dimensione della mesh è stata svolta un'analisi di sensitività.

A partire dallo scenario S1 è stato sviluppato uno scenario d'incendio variando la dimensione della griglia di calcolo in corrispondenza dell'incendio.

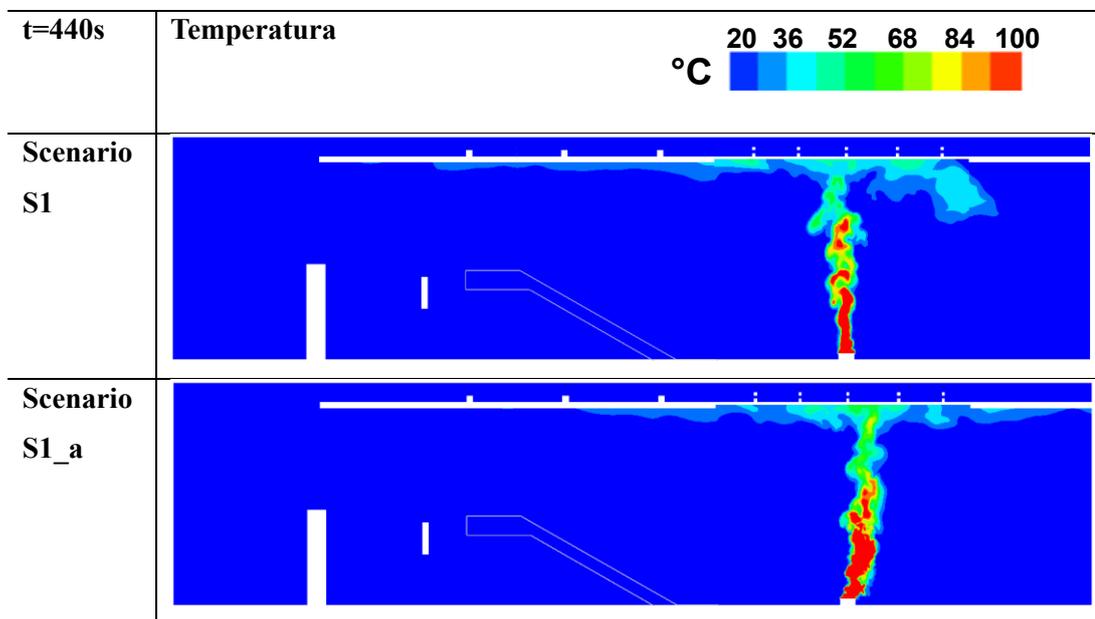
Tabella 36: dimensioni della griglia

Scenario	Dimensione griglia di calcolo sull'incendio
	[m x m x m]
S1	0.1 – 0.1 - 0.1
S1_a	0.05 – 0.05 – 0.05

I 'analisi dei due scenari sono analoghe e pertanto è garantita l'indipendenza dalla griglia di calcolo.

In seguito, si confrontano i risultati in termini di temperatura dei gas passante per una sezione dell'incendio, valutato all'istante $t=440s$ (HRR_{max}).

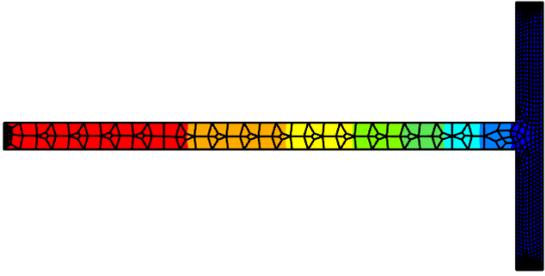
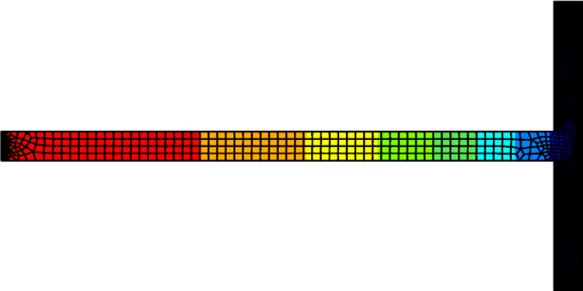
Tabella 37: confronto analisi CFD



Analisi FEM

Al fine di garantire l'indipendenza dei risultati dalla dimensione della mesh è stata svolta un'analisi di sensitività per l'elemento strutturale soggetto ad una azione termica maggiore.

Tabella 38: confronto analisi FEM

Elemento	Andamento della temperatura
2	 <p data-bbox="1107 539 1378 958"> NODES : 1106 SOLIDS : 962 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 592 sec TEMPERATURE : 200,0°C to 206,0°C 194,0°C to 200,0°C 187,9°C to 194,0°C 181,9°C to 187,9°C 175,9°C to 181,9°C 169,9°C to 175,9°C 163,9°C to 169,9°C 157,8°C to 163,9°C </p>
2_a	 <p data-bbox="1107 987 1378 1361"> NODES : 3741 SOLIDS : 3440 MESH PLOT TEMPERATURE PLOT TIME : 592 sec TEMPERATURE : 199,9°C to 206,0°C 193,9°C to 199,9°C 187,9°C to 193,9°C 181,9°C to 187,9°C 175,9°C to 181,9°C 169,8°C to 175,9°C 163,8°C to 169,8°C 157,8°C to 163,8°C </p>

Bibliografia

[1] Aguinagalde, A., Bontempi F., Petrini F. Progettazione strutturale antincendio, Come sviluppare analisi strutturali e verifiche di sicurezza in caso di incendio: Dario Flaccovio Editore.

[2] Carpinteri A. Scienza delle costruzioni 2: Società Editrice Esculapio.

[3] Viola E. Lezioni di scienza delle costruzioni, Bologna, Italia: Pitagora Editrice Bologna.

[4] DM 18/10/2019, Codice di prevenzione incendi, 2023.

[5] EN 1991-1-2:2002, Action on structures exposed to fire.

[6] EN 1993-1-2:2005, Design of steel structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design.

[7] NFPA 101: Life Safety code

[8] NTC 17/01/2018- Norme tecniche delle costruzioni

[9] SFPE Handbook of fire protection engineering

[10] DM 03/08/2015, codice di prevenzione incendi

[11] L Staffansson, selecting design fires (Lund 2010)

[12] NB SIR 88-3752- ATF NIST Dynamics

[13] Quintiere, Fire Behaviour - Nist NRC Validation

[14] Inail, Focus sulla misura S2 del codice di prevenzione incendi

[15] Alfano G., Betta V., Lezioni di fisica tecnica: Liguori Editore.

[16] EN 1991-1-1, Regole generali e Regole per gli edifici

[17] https://www.uee.uliege.be/cms/c_4016387/fr/uee-safir-resources

[18] <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>

[19] <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>

[20] Inail, Focus sui Metodi del Codice di prevenzione incendio, 2019.