

Articoli sul mondo della prevenzione incendi

ALL'INTERNO

Le scoperte del mese

Individuiamo le tematiche più interessanti

Newsletter aziendale

Ogni mese ci trovate online sul sito di ProFire

L'osservatore

Collaboriamo con professionisti, aziende e vigili del fuoco



Il collasso implosivo nella Progettazione antincendio prestazionale

- di Ing. Nicola Clemeno, Ing. Andrea Massimo Carbonaro e Dott. Maurizio Antonelli

Lo studio del **collasso implosivo** mediante l'**ingegneria della sicurezza antincendio** rappresenta un pilastro della progettazione prestazionale, superando i limiti del tradizionale approccio prescrittivo.

L'obiettivo di questa disciplina è analizzare e governare i cinematismi di **cedimento di un'opera strutturale esposta al fuoco**, garantendo che l'eventuale **crollo avvenga verso l'interno del sedime dell'edificio** per proteggere le aree limitrofe. Attraverso l'integrazione di curve d'incendio naturali, analisi termo-strutturali e modellazioni numeriche avanzate (FEM), il professionista antincendio è in grado di valutare il progressivo degrado meccanico dei materiali ad alte temperature e i meccanismi di ridondanza strutturale.

Questo FOCUS delinea il quadro metodologico e normativo necessario per prevedere, simulare e guidare tali fenomeni estremi, coniugando la salvaguardia della vita con la tutela del tessuto urbano circostante.



L'approccio prestazionale

L'approccio tradizionale alla progettazione antincendio, di carattere prescrittivo, garantisce la resistenza strutturale delle opere da costruzione mediante l'impiego di materiali che offrono prestazioni di resistenza al fuoco notevoli, spesso di gran lunga superiori a quelle realmente necessarie per le attività che vi si svolgono all'interno. Questo approccio progettuale, grazie alla sua natura conservativa, ha garantito nel tempo dei livelli di sicurezza notevoli nei confronti dell'incendio e continua ancora oggi a essere una strada valida per un ampio numero di strutture.

L'ingegneria della sicurezza antincendio, diversamente, si basa su un approccio prestazionale alla progettazione antincendio: le opere da costruzione sono realizzate avendo in considerazione le attività che devono ospitare, impiegando materiali adeguati a garantire il livello di prestazione individuato dal professionista antincendio.

Per diverse attività, quindi, l'approccio prestazionale consente di ottenere un importante risparmio economico nella scelta dei materiali, a condizione che le strutture ospitanti non procurino danni nelle loro immediate vicinanze a causa di un incendio. Questo requisito è soddisfatto nel momento in cui gli edifici sono progettati affinché il loro collasso dovuto all'incendio abbia carattere implosivo.

Livelli di prestazione della resistenza al fuoco per il collasso strutturale

Il collasso implosivo nella progettazione antincendio trova i suoi riferimenti nel panorama normativo italiano all'interno del Codice di prevenzione incendi: nel Capitolo S.2 Resistenza al fuoco, infatti, si individua la misura antincendio che ha il fine di garantire la capacità portante delle strutture in condizioni di incendio contemplando cinque



livelli di prestazione, il primo dei quali prevede l'assenza di conseguenze esterne in seguito al collasso strutturale.

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.

Tabella S.2-1: Livelli di prestazione

Figura 1 Livelli di prestazione per la misura antincendio di resistenza al fuoco.

I criteri di attribuzione per i livelli di prestazione I e II della resistenza al fuoco prevedono entrambi che, per le opere da costruzione interessate dal progetto, l'eventuale cedimento strutturale dovuto all'incendio non arrechi danni ad altre opere da costruzione oppure all'esterno del confine dell'area dove sorgono le attività. Le soluzioni conformi per questi livelli di prestazione indicano che debba essere interposta una distanza di separazione su spazio a cielo libero, non inferiore alla massima altezza della costruzione, verso altre opere da costruzione e verso il confine dell'area dove sorge l'attività interessata dal progetto: questa misura garantisce che non vi siano conseguenze esterne in caso di collasso strutturale.

Vi sono molte situazioni, in modo particolare nel mondo industriale, dove è possibile attribuire all'attività un livello di prestazione I o II della resistenza al fuoco per l'opera da costruzione senza, però, poter realizzare la distanza di separazione su spazio a cielo libero così come previsto dalla soluzione conforme. In questo caso, il Codice di prevenzione incendi consente al professionista antincendio, come soluzione alternativa, di dimostrare analiticamente che il collasso dell'opera da costruzione non arreca danno ad altre opere da costruzione né al di fuori del confine dell'area dell'attività. Nel caso in cui si sia attribuito all'attività un livello di prestazione II per la resistenza al fuoco, la soluzione alternativa prevede che il professionista antincendio verifichi il mantenimento della capacità portante dell'opera da costruzione per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti verso il più vicino luogo sicuro all'esterno.

Oggetto della soluzione	Modalità progettuale
Verifica dell'assenza di danneggiamento ad altre costruzioni	<p>Si dimostri <i>analiticamente</i> che il meccanismo di collasso dell'opera da costruzione sia di tipo <i>implosivo</i> utilizzando, ad esempio, uno o più degli accorgimenti tecnici di seguito elencati che consentano di <i>guidare</i> la modalità di collasso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • adozione di criteri di gerarchia di resistenza al fuoco (es. assegnazione di sovrarresistenza al fuoco alle strutture perimetrali dell'opera da costruzione rispetto a quelle interne, ...); • distribuzione spaziale dei carichi di incendio verso zone interne; • adozione di forme strutturali convenienti (es. con inclinazione verso l'interno, ...); • adozione di <i>elementi chiave</i> in posizione opportuna; • impiego di sistemi automatici per il controllo dell'incendio a <i>disponibilità superiore</i>; • impilaggio piramidale dei materiali combustibili stoccati; • adozione di vincoli che agevolino il collasso implosivo.

Tabella S.2-4: Modalità progettuali per soluzioni alternative, livello di prestazione I

Figura 2 Modalità progettuali per soluzioni alternative per un livello di prestazione I della misura antincendio di resistenza al fuoco.

Sia per la verifica dell'assenza di danneggiamento ad altre costruzioni, sia per il mantenimento della capacità portante in condizioni d'incendio al fine di garantire l'esodo degli occupanti, il professionista antincendio deve verificare le prestazioni di resistenza al fuoco dell'opera da



costruzione individuando degli scenari d'incendio rappresentati da curve naturali d'incendio. È con questa verifica che entra in gioco l'ingegneria della sicurezza antincendio e la progettazione antincendio diventa prestazionale: il professionista antincendio è tenuto a individuare, per quella sola opera da costruzione e per le sole attività che si svolgono al suo interno, gli scenari di incendio utili a determinare il tempo necessario per l'esodo degli occupanti e le sollecitazioni cui sono sottoposti gli elementi strutturali, così da dimostrare che l'attività tutta soddisfa il livello di prestazione attribuite per la resistenza al fuoco.

Qualora si sia attribuito all'attività il livello di prestazione II per la resistenza al fuoco, dovendo verificare il mantenimento delle condizioni portanti dell'opera da costruzione per consentire agli occupanti di evacuare l'edificio e raggiungere il più vicino luogo sicuro, deve individuare la durata minima dello scenario d'incendio.

Obiettivo di sicurezza antincendio	Durata minima degli scenari di incendio di progetto
Salvaguardia della vita degli occupanti	Dall'evento iniziatore fino al momento in cui tutti gli occupanti dell'attività raggiungono o permangono in un luogo sicuro. Se il luogo sicuro è prossimo o interno all'opera da costruzione, devono essere valutate eventuali interazioni tra il mantenimento della capacità portante dell'opera da costruzione ed il luogo sicuro.
Salvaguardia della vita dei soccorritori	Dall'evento iniziatore fino a 5 minuti dopo il termine delle operazioni previste per i soccorritori o l'arrivo delle squadre dei Vigili del fuoco presso l'attività. Il tempo di riferimento per l'arrivo dei Vigili del fuoco può essere assunto pari alla media dei tempi d'arrivo desunti dall' <i>Annuario statistico dei Vigili del fuoco</i> (http://www.vigilfuoco.it), considerando i dati dell'ultimo anno disponibile, riferiti all'ambito provinciale.
Mantenimento della capacità portante in caso d'incendio	Dall'evento iniziatore fino all'arresto dell'analisi strutturale, in fase di raffreddamento, al momento in cui gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti

Tabella M.2-1: Durata minima degli scenari d'incendio di progetto

Figura 3 Durata minima degli scenari d'incendio di progetto in funzione dell'obiettivo di sicurezza antincendio da conseguire tramite l'ingegneria della sicurezza antincendio.

Dinamiche di collasso

Garantire che in caso d'incendio non vi siano conseguenze esterne per collasso strutturale richiede, come detto in precedenza, di individuare degli scenari d'incendio rappresentati da curve naturali d'incendio: le attività svolte all'interno dell'opera da costruzione determinano lo sviluppo dell'incendio in maniera unica per la situazione dell'edificio interessato dal progetto, i cui elementi strutturali sono interessati da deformazioni dovute all'aumento di temperatura, cambiamenti delle resistenze meccaniche e conseguenti sollecitazioni che portano al collasso.

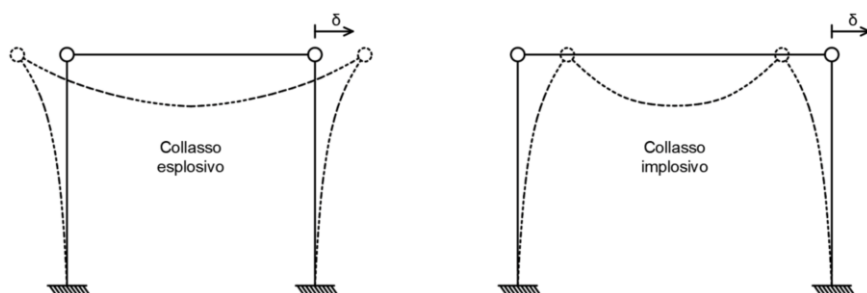


Figura 4 Rappresentazione schematica del collasso esplosivo (sinistra) e del collasso implosivo (destra).

Quando un'opera da costruzione va incontro al collasso, quest'ultimo può essere esplosivo se gli elementi strutturali si spostano verso

l'esterno, oppure implosivo se si spostano verso l'interno; dal momento che il professionista antincendio ha lo scopo di evitare conseguenze esterne in seguito a un collasso, quest'ultimo deve essere implosivo.

Analisi prestazionale della resistenza al fuoco per Magazzini Autoportanti Automatizzati: l'applicazione della FSE al caso studio

La progettazione antincendio dei magazzini intensivi autoportanti rappresenta una sfida ingegneristica complessa, data l'elevata densità di carico d'incendio e l'utilizzo di elementi strutturali in acciaio a spessore ridotto. Il presente articolo illustra l'applicazione della Fire Safety Engineering (FSE) per la verifica termo-strutturale del nuovo magazzino automatizzato in Provincia di Modena. Attraverso l'uso del codice di calcolo non lineare SAFIR, è stato simulato il comportamento al fuoco della struttura, dimostrando il mantenimento della stabilità globale e la corretta gestione dei cinematismi di collasso.

Introduzione e contesto operativo

L'evoluzione della logistica industriale spinge verso la realizzazione di magazzini intensivi automatizzati sempre più capienti. La struttura oggetto del presente studio è il magazzino autoportante automatizzato a Formigine (MO), destinato allo stoccaggio di ruote e supporti per applicazioni industriali e domestiche, riportato nella Figura 5.

Il fabbricato si configura come una struttura in fossa (profondità -4,6 m) che si eleva per circa 27 metri fuori terra, raggiungendo un'altezza interna di 30 metri su una superficie di compartimento di circa 1.255 m². Il magazzino è servito da due trasloelevatori ed è caratterizzato da 21 livelli di stoccaggio. Trattandosi di un ambiente con un elevato quantitativo di materiale combustibile e strutture in acciaio non protetto ad elevato fattore di sezione, un eventuale incendio potrebbe determinare tempi ridotti di stabilità portante. Pertanto, la progettazione è stata affrontata mediante i metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio (D.M. 03/08/2015), applicando soluzioni progettuali alternative mirate a garantire che un'eventuale perdita di stabilità si manifesti con un meccanismo di collasso verso l'interno (implosivo).

Tipologia strutturale e materiali

Dal punto di vista strutturale, il magazzino è composto da scaffalature metalliche in profili formati a freddo e carpenteria, schermato da pannelli sandwich collegati alla struttura. Il sistema primario è costituito da:

- **Direzione trasversale:** spalle tralicciate porta-pallet (montanti tubolari e tralicciatura a C) collegate alla sommità.



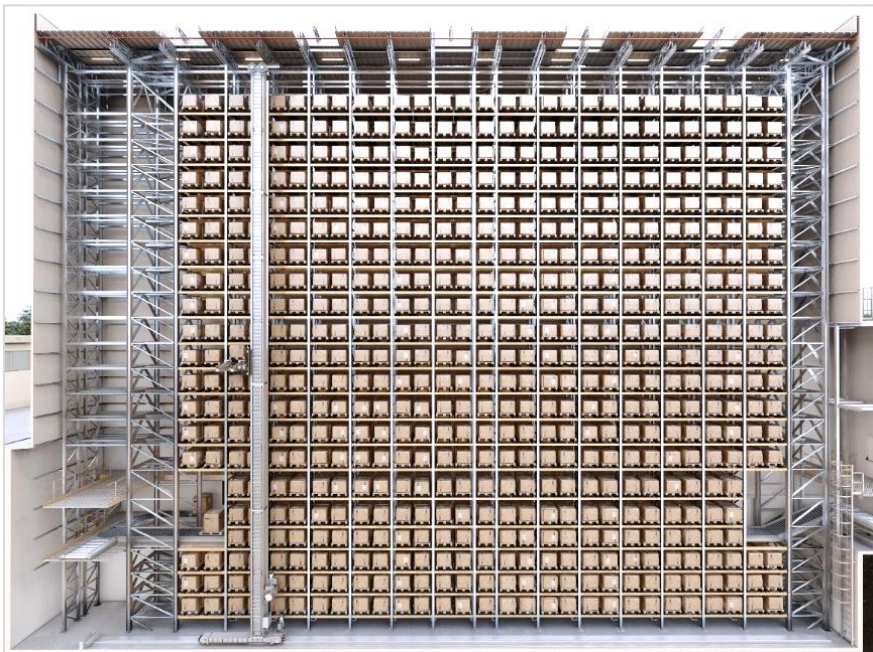


Figura 5 Sezione longitudinale magazzino automatizzato e baie di carico oggetto di analisi - Modello 3D

- **Direzione longitudinale:** torri di controvento con montanti in HEA, tralicciature tubolari e correnti con sezione a C.

I materiali impiegati per le sezioni resistenti (arcarecci, briglie, correnti, diagonali, montanti e traversi) sono acciai strutturali di classe S355 JR ($f_{yk}=355$ MPa), S350 GD ($f_{yk}=350$ MPa) e S420 GD ($f_{yk}=420$ MPa), tutti appartenenti alla classe di duttilità IV, sensibili a fenomeni di instabilità locale in caso di riscaldamento.

Scenario d'incendio di progetto (FSE)

La valutazione è stata condotta sulla base degli incendi naturali di progetto. L'analisi CFD preventiva ha individuato due scenari principali d'innesco:

- **Scenario S1:** Focolare alla base (quota -3,00 m) sul trasloelevatore prossimo all'edificio S1 adiacente. Questo scenario massimizza le temperature nella parte inferiore della struttura centrale, aggravato da un ritardo nell'attivazione dell'impianto sprinkler.
- **Scenario S2:** Innesco su scaffale di testa in quota (+9,0 m), volto a testare il confine di proprietà fronte est in caso di collasso della struttura.

Lo studio termo-strutturale si è concentrato sullo scenario S1, in quanto più gravoso per il rischio di collasso globale e per i potenziali effetti domino sui fabbricati preesistenti.

Modellazione avanzata con SAFIR: analisi termica

L'analisi termica è stata condotta utilizzando **SAFIR**, un codice agli elementi finiti specializzato nel comportamento al fuoco, sviluppato dall'Università di Liegi. Il software opera suddividendo le sezioni in fibre, consentendo un accoppiamento tra analisi termica e meccanica e

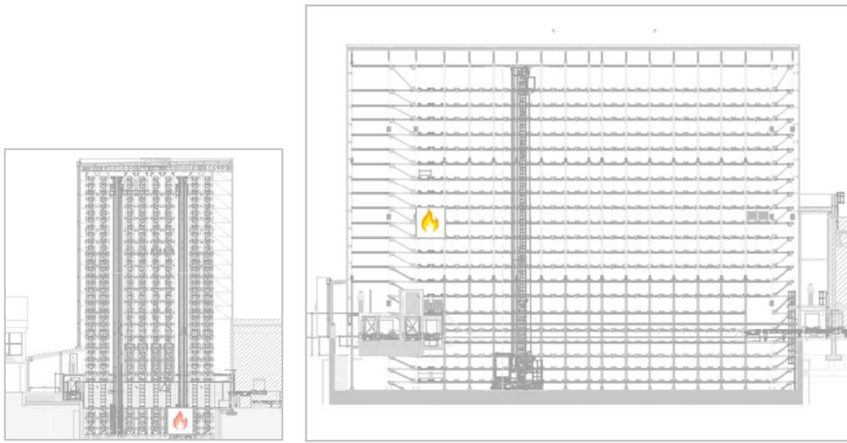


Figura 6 Sezioni magazzino automatizzato - Individuazione focolari di innesco: **Scenario S1** e **Scenario S2** applicando le equazioni di Fourier e le prescrizioni della norma UNI EN 1993-1-2.

Per ottimizzare il calcolo, è stata isolata una sottostruttura tridimensionale di tre campate in direzione longitudinale, prossima al punto di innesco dello Scenario S1, illustrata nella Figura 7.

I risultati dell'analisi termica indicano gradienti di temperatura severi ma localizzati. Ad esempio:

- Il corrente più prossimo al focolaio (Sezione C1) raggiunge una temperatura massima di circa 526 °C dopo 12 minuti (Figura 8).
- I montanti adiacenti (Sezione M6) raggiungono picchi di 467 °C dopo circa 28 minuti. L'analisi mostra come l'allontanamento dal focolare garantisca un netto ritardo nel riscaldamento e valori di temperatura significativamente inferiori.

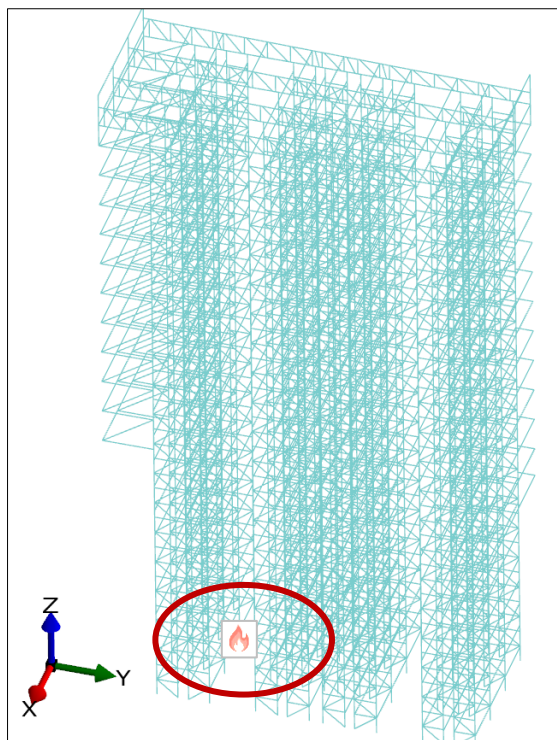
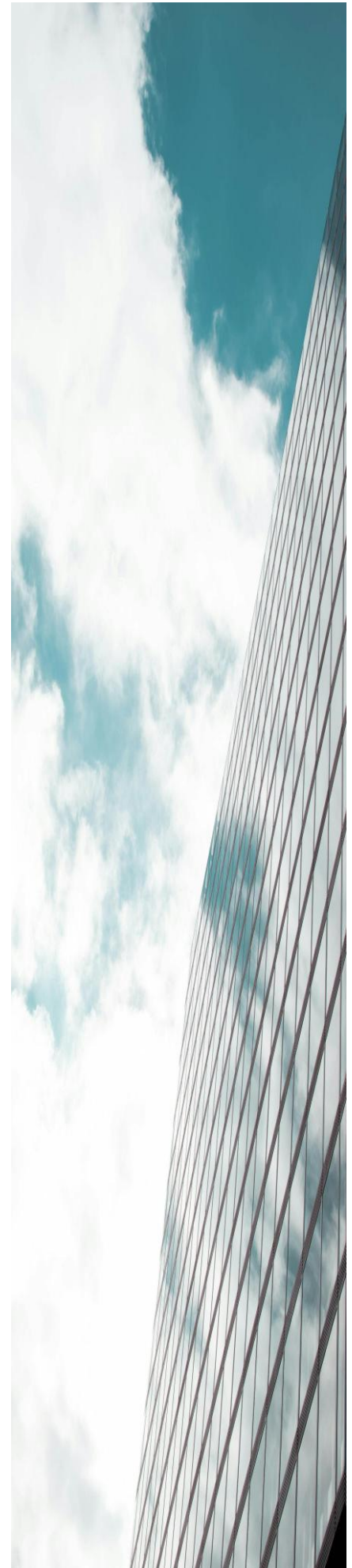


Figura 7 Posizione del focolaio dell'incendio di progetto S1 - Sottostruttura 3D in Diamond



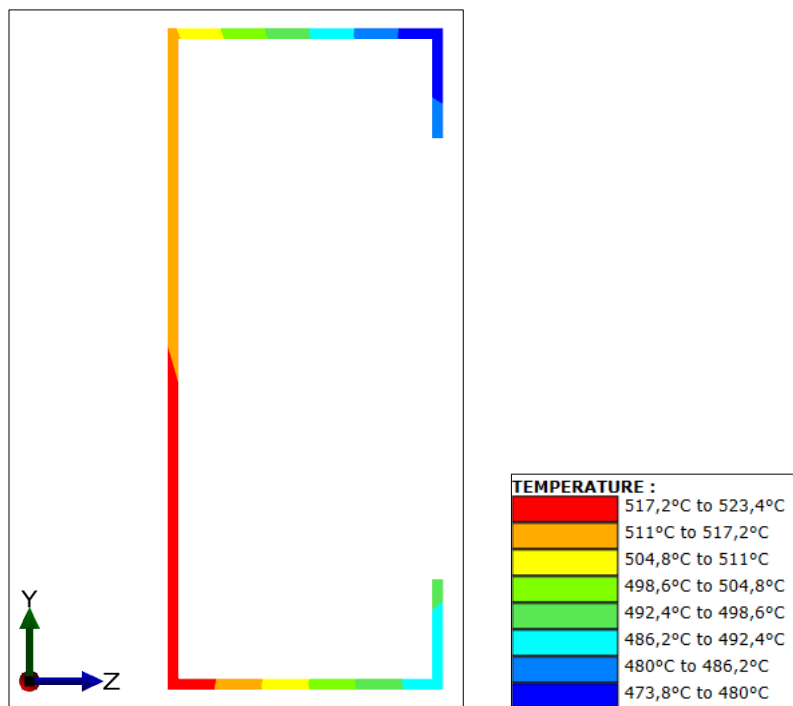


Figura 8 Scenario S1: Temperatura del correzione (Sezione C1) prossimo al focolaio a 12 min

Risposta termo-strutturale e verifiche di collasso

Durante l'esposizione all'incendio, la dilatazione termica degli elementi in acciaio, contrastata dai vincoli statici della struttura autoportante, genera la nascita di stati coattivi, azioni indirette ed effetti del secondo ordine, combinati a una degradazione delle resistenze e rigidità (secondo le curve di decadimento degli Eurocodici).

Deformazioni e spostamenti

L'analisi meccanica al tempo limite di 1.800 secondi (30 minuti) evidenzia che la struttura non subisce alcun collasso generalizzato. Le deformazioni massime si registrano, in modo localizzato, nei nodi prossimi al focolaio, con spostamenti orizzontali massimi di $\delta_1 = 7,5$ mm e spostamenti verticali di $\delta_3 = 19$ mm. Si riporta nella Figura 9 la deformata della struttura a dopo 1.800 secondi (30 minuti) nella sezione longitudinale.

Sollecitazioni interne

Il software ha mappato le variazioni delle sollecitazioni. Nelle aste vicine all'incendio (ad esempio montanti e correnti), la "spinta termica" dovuta alla dilatazione impedita altera radicalmente le distribuzioni degli sforzi. Gli elementi verticali registrano incrementi dello sforzo di compressione con andamenti non lineari. I traversi e i correnti evidenziano forti variazioni anche nei momenti flettenti e nelle azioni di taglio.

Verifica delle connessioni

Di cruciale importanza è la tenuta dei collegamenti, essenziale per garantire, in caso estremo, un collasso di tipo implosivo che non riversi carichi verso l'esterno. Sono stati verificati i nodi critici, come le connessioni bullonate (bulloni M10 ed M12 classe 8.8) tra montanti e correnti. A fronte di una resistenza a taglio a caldo $F_{v,t,Rd}$ pari a 15,3 kN, l'azione di taglio sollecitante si attesta a soli 7,45 kN. Analogamente, la resistenza a trazione in condizione di incendio $F_{ten,t,Rd}$ di 52,40 kN risulta



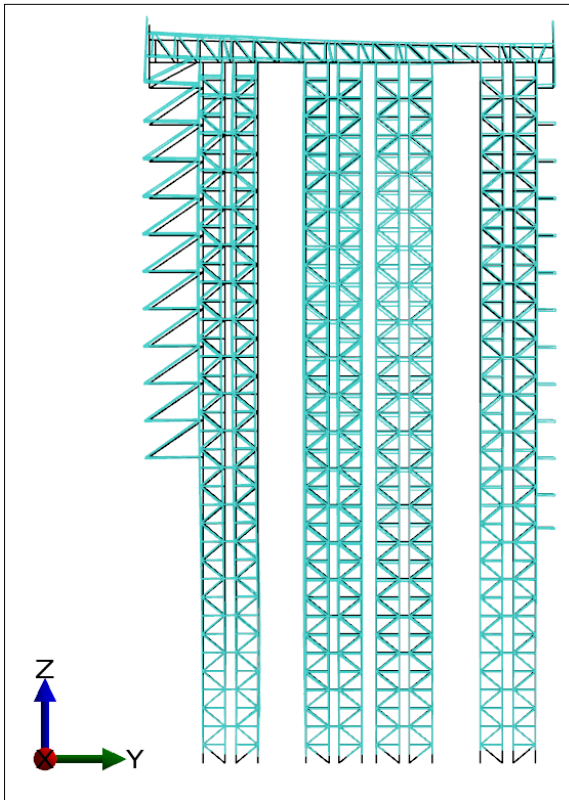


Figura 9 Scenario S1: Deformata della struttura a dopo 1.800 secondi (30 min)
(scala di visualizzazione x50)

superiore ai 51,00 kN derivanti dal calcolo termomeccanico. Entrambi i meccanismi sono quindi pienamente verificati.

Conclusione

L'applicazione della Fire Safety Engineering alla struttura autoportante del magazzino ha dimostrato la validità delle soluzioni progettuali adottate ai sensi del D.M. 03/08/2015. Nonostante l'impiego di elementi in acciaio sottili in classe IV e l'elevato carico d'incendio, l'analisi termo-strutturale condotta mediante elementi finiti ha attestato che le strutture portanti in acciaio mantengono la loro stabilità globale per l'intera durata dell'incendio convenzionale di progetto (30 minuti per lo Scenario S1 controllato da sprinkler). Anche nell'ipotesi remota di cedimento, il mantenimento delle resistenze residue nei collegamenti garantisce che il cinematismo di collasso sia di tipo implosivo, annullando il rischio strutturale per i fabbricati adiacenti e tutelando la sicurezza generale del complesso.

Bibliografia

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Norme tecniche per le costruzioni*, Allegato al D.M. 17 gennaio 2018 e s.m.i.

Ministero dell'Interno, *Codice di prevenzione incendi*, Allegato I al D.M. 3 agosto 2015 e s.m.i.

UNI EN 1991-1-2:2024 *Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco*