

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

Structural Strengthening And Rehabilitation

Verifica al fuoco di edificio industriale con struttura in acciaio

CANDIDATO:
Dott. Quarta Andrea

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Ing. Benedetti Andrea

CORRELATORI:
Ing. Galeotti Gianluca
Ing. Battistini Filippo
VF Ing. Gamberi Claudio

Anno Accademico 2016/17
Sessione II



Quarta Andrea

FSE PROGETTI S.r.l.

Via Cerchia di Martorano 1069,
47522 Cesena (FC)

Tel. 3297784674

Mail: andrea@fseprogetti.it

Web: www.fseprogetti.it

SOMMARIO

• SOMMARIO

SOMMARIO.....	4
ABSTRACT	8
PAROLE CHIAVE	9
INTRODUZIONE.....	10
1 Caso studio	11
FISICA DELL'INCENDIO	13
1 Chimica della combustione	13
2 Reazione chimica	14
3 La tavola periodica degli elementi.....	15
4 Generalità della combustione	17
5 Propagazione della combustione	18
6 Temperatura di infiammabilità.....	19
7 Temperatura di accensione	20
8 Esplosione, deflagrazione e detonazione	21
9 Combustibili.....	22
10 Esplosivi	26
11 Esplosibilità di polveri	30
12 Dinamica degli incendi.....	31
ANALISI TERMICA.....	38
1 Sviluppo di un incendio	38
2 Scenari di incendio.....	39
3 Curve nominali o standard	41
4 Carico di incendio	43
5 Curve parametriche	45
6 Incendi localizzati.....	49
7 Confronto tra i casi analizzati	52
8 Velocità di rilascio Q	53
9 Trasmissione del calore	57
10 Proprietà termiche dell'acciaio	61
11 Analisi termica semplificata per sezioni in acciaio	65
11.1 Sezioni in acciaio non protette	65

11.2	Sezioni in acciaio protette	72
12	Analisi termica avanzata per sezioni in acciaio	72
13	Validazione analisi termica	75
ANALISI MECCANICA		80
1	Progettazione strutturale in caso di incendio	80
1.1	Metodi di verifica.....	81
2	Azioni sulle strutture in condizioni di incendio	82
3	Metodi di calcolo	84
4	Analisi di membrature	85
5	Analisi di parti di struttura.....	86
6	Analisi di intere strutture.....	87
7	Progetto di strutture soggette ad incendio.....	88
8	Proprietà meccaniche dell'acciaio in caso di acciaio	89
8.1	Proprietà degli acciai	89
8.2	Bulloni e saldature	94
9	Verifica di membrature soggette a carico di incendio	96
9.1	Verifica semplificata di membrature.....	97
10	Meccanismi di membrature soggette a carico di incendio	116
10.1	Effetti dell'incendio sulle membrature.....	117
10.2	Dilatazione termica in elementi isostatici	119
10.3	Dilatazione termica in presenza di vincoli rigidi alla traslazione.....	120
10.4	Dilatazione termica in presenza di vincoli laterali deformabili	122
10.5	Cinematica della trave soggetta a carico di incendio a temperatura non uniforme.....	123
10.6	Deformazione per variazione termica lineare (Thermal bowing)	124
10.7	Deformazione per variazione termica costante (Thermal expansion).....	126
10.8	Statica della trave soggetta a riscaldamento	129
10.9	Raggiungimento del limite elastico della trave	130
10.10	Raggiungimento del limite ultimo	131
11	Validazione analisi meccanica	133
11.1	Bowing effect e catenaria.....	133
12	Thermal buckling	152
13	Verifiche di sottostrutture soggette a carico di incendio	157
13.1	Principio di Rankine - Marchant	158
14	Meccanismi globali della struttura soggette a carico di incendio	162
14.1	Iperstaticità.....	163

14.2	Collasso a catena	165
14.3	Edifici monopiano	165
14.4	Cinematica della struttura	169
ANALISI FEM		174
1	Funzionamento	174
2	Fasi per arrivare al modello	176
3	Caratteristiche degli elementi	176
4	Tipologia di elementi finiti	177
5	Software di analisi: Straus7	179
6	L'analisi del trasporto del calore	182
7	Formulazione agli elementi finiti	182
8	Utilizzo dei risultati per l'analisi strutturale	184
9	Altre applicazioni del solutore termico	185
10	Soluzione in regime stazionario	186
11	Equazione di equilibrio	187
12	Soluzione in regime transitorio	188
12.1	Parametri del solutore	189
12.2	Condizioni iniziali	189
CASO DI STUDIO		192
1	Applicazione del codice di prevenzione incendi	196
2	Resistenza al fuoco S2	198
3	Modellazione avanzata di esodo	202
4	Telaio perfetto	206
5	Telaio semplice imperfetto	248
6	Analisi globale	289
7	Scenari di incendio	293
8	Struttura perfetta	298
9	Struttura imperfetta	368
FIRE SAFETY ENGINEERING		437
1	Obiettivo dell'analisi	442
2	Geometria del problema	443
3	Modellazione su CFAST	446
4	Risultati dell'analisi	456
5	Protezione delle strutture in acciaio con vernici intumescenti	462
5.1	Determinazione dello spessore di protettivo	463

5.2	Determinazione della curva naturale di progetto con protettivo	465
6	Applicazione delle curve naturali al modello pretetto	468
7	Verifiche.....	474
7.1	Collasso implosivo	474
7.2	Verifica nel dominio delle temperature	480
7.3	Verifica nel dominio del tempo	480
7.4	Verifica nel dominio delle resistenze	487
7.5	Verifica delle deformazioni.....	491
CONCLUSIONI		493
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA.....		495
RINGRAZIAMENTI		498

ABSTRACT

Nel presente elaborato, si mostrerà come il fine ultimo della fire safety engineering sia una progettazione che garantisca la capacità portante delle strutture nelle condizioni d'incendio, difendendo l'incolumità umana, l'ambiente e l'edificio esaminato, riuscendo, oltretutto, ad ottimizzarne i costi.

Si procederà analizzando dettagliatamente il fenomeno della combustione in ogni sua parte, mostrando come l'incendio sia un evento estremamente pericoloso, capace di sfuggire facilmente al controllo dell'uomo.

Successivamente, saranno passate in rassegna le varie fasi caratteristiche dell'incendio, anche attraverso un'adeguata analisi termica in funzione del tempo, per poi evidenziare, inoltre, come la definizione di un opportuno scenario d'incendio di progetto risulti fondamentale per un progetto d'ingegneria strutturale antincendio.

Si provvederà anche a riportare le varie metodologie di progettazione strutturale antiincendio, fornendo adeguati strumenti per il calcolo e delineando l'importanza delle condizioni di vincolo e dei carichi per l'analisi della capacità portante di una struttura esposta all'incendio.

Subito dopo tale analisi meccanica, si passerà ad illustrare il metodo degli elementi finiti (FEM), oltre che l'importanza di quest'ultimo per ciò che concerne i software d'analisi attualmente in vendita, quali Straus7, utilizzato anche nello sviluppo della presente Tesi.

Infine, si analizzerà il caso di studio in questione, ovvero la valutazione del comportamento al fuoco di un deposito intensivo verticale per lo stoccaggio di farina in sacchi, un materiale altamente infiammabile, riportando anche una dettagliata analisi globale della struttura.

PAROLE CHIAVE

Straus7

Resistenza passiva

FSE

Collasso implosivo

Curva naturale

Cfast

Analisi termica avanzata

Analisi meccanica avanzata

Intumescente

INTRODUZIONE

“La finalità della resistenza al fuoco è quella di garantire la capacità portante delle strutture in condizioni di incendio nonché la capacità di compartimentazione, per un tempo minimo necessario al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza di prevenzione incendi.”

È con questa introduzione che esordisce il capitolo S.2 del nuovo codice di prevenzione incendi, che presenta i seguenti punti fondamentali:

- **Difendere la vita**, garantendo vie di fuga e percorsi di evacuazione idonei, liberi dal fumo e dal fuoco nel corso del raggiungimento di luoghi incolumi.
- **Proteggere beni**, riferendosi, oltre che alla struttura dell’edificio e al suo contenuto, anche agli edifici limitrofi.
- **Preservare l’ambiente**, facendo in modo che i danni ambientali, come le emissioni di gas inquinanti sprigionati dal fumo e l’inquinamento dell’acqua utilizzata per spegnere l’incendio, siano il più limitati possibile.

Nel ramo della Fire Safety Engineering si tiene conto di questi aspetti:

- Verifica dell’innesco dell’incendio per mezzo di controlli sulle varie proprietà dei materiali utilizzati, con particolare attenzione all’infiammabilità.
- Accertamento delle vie di fuga, facendo modo che siano adeguate per un’evacuazione sicura e il più veloce possibile da parte di tutti gli occupanti dell’edificio, tenendo conto anche di alcune apposite regolamentazioni che ne dettano le norme.
- Rilevazione dell’incendio attraverso specifici sistemi manuali o automatici, come gli strumenti di rilevamento di calore e fumo. È inoltre necessario realizzare impianti per l’estinzione dell’incendio, i quali, ancora una volta, possono essere automatici, come gli impianti sprinkler ad acqua, a schiuma, ad halon, a diossido di carbonio e a polvere, oppure manuali, come nel caso degli estintori, per i quali è dettata, oltre ad un numero minimo, anche la posizione in cui devono essere presenti nell’edificio.
- Vigilare sullo sviluppo dell’incendio, utilizzando una compartimentazione per limitare la diffusione delle fiamme in modo circoscritto alla zona ove si è sviluppato l’incendio, così da impedire una sua espansione all’interno dello stesso edificio o ai danni degli edifici limitrofi.
- Progettazione strutturale per la fase d’incendio, assicurando resistenza strutturale e stabilità dell’edificio, in modo da evitare crolli notevoli di alcune sue porzioni o dell’edificio stesso.

Quando si parla di “resistenza al fuoco delle strutture” si fa riferimento al comportamento, durante le fasi dell’incendio, di quegli elementi, sia di tipo portante

che separante, che presentano funzioni strutturali negli edifici. Si parla, dunque, dell'intervallo di tempo, espresso in minuti, dell'esposizione all'incendio, in cui ogni elemento della struttura deve preservare i propri requisiti progettuali inerenti alla stabilità meccanica e alla tenuta della combustione. Inoltre, occorre precisare come la resistenza al fuoco delle strutture possa essere chiarita come la capacità intrinseca di un elemento da costruzione a mantenere:

- La stabilità R, cioè la propensione di un elemento da costruzione a preservare la propria resistenza meccanica durante l'incendio;
- La tenuta E, cioè l'inclinazione di un elemento da costruzione a bloccare e a evitare di generare fiamme, gas o vapori sul lato non attaccato dal fuoco;
- L'isolamento termico I, ovvero la predisposizione di un elemento da costruzione a limitare il passaggio del calore.

Dunque, un elemento costruttivo, attuo a preservare, in un determinato lasso di tempo, la stabilità, l'isolamento termico e la tenuta, è identificato con il simbolo REI, mentre con la sigla RE è utilizzata per contrassegnare una componente strutturale che deve tutelare la propria stabilità e tenuta entro un certo periodo. Infine, l'abbreviazione R si riferisce a un elemento che, sempre in un dato intervallo di tempo, deve assicurare la propria stabilità.

1 CASO STUDIO

L'edificio analizzato dal presente elaborato di tesi è un capannone industriale in acciaio strutturale laminato a caldo.

Si tratta di un deposito automatizzato, in cui vengono, grazie a sistemi automatici, stoccati ed impilati, fino ad una quota di 15 m, sacchi big-bag contenenti farine di cereali, le quali sono caratterizzate da elevati carichi d'incendio e volumetrie considerevoli.

L'edificio in studio è caratterizzato da un unico corpo di dimensioni 26 m x 43 m x 17 m, pari ad un volume interno di 19.000 m³. Inoltre, è costruito con acciaio nudo che, se progettato in maniera adeguata, permette di raggiungere eccellenti performance in termini di prestazioni antincendio.

Il progetto antincendio è stato definito con l'uso dell'RTO ed in particolare con l'applicazione di strategie alternative con riferimento alle S2. Per quanto concerne il punto S2 si applica il Livello II. Poiché l'edificio è addossato ad un altro fabbricato, è stato necessario verificare che il collasso non fosse in grado di coinvolgere strutture attigue, tenendo anche conto che la struttura doveva mantenere una certa resistenza al fuoco, tale da permettere l'evacuazione degli occupanti.

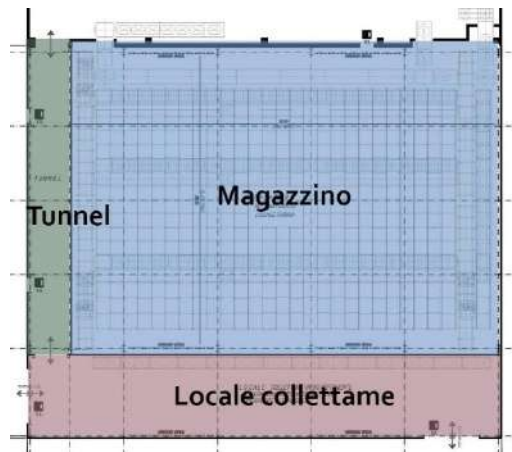


Figura 1.1-Planimetria locali



Figura 2.2-Struttura in costruzione

Lo studio della presente tesi si concentra sull'analisi della resistenza al fuoco della struttura in acciaio, con particolare riferimento alla resistenza delle colonne. Lo scopo ultimo è dimostrare l'implosività della struttura durante le fasi di collasso, nonché quello di sottolineare i benefici della modellazione analitica avanzata, derivante dall'applicazione di diversi scenari di progetto.

FISICA DELL'INCENDIO

1 CHIMICA DELLA COMBUSTIONE

Tutto ciò che possiede una qualsiasi massa e che occupa un qualsiasi spazio è costituito da una serie di elementi: gli atomi. Questi sono formati da particelle più piccole, dette *subatomiche*, le quali sono caratterizzate da avere una data carica e una certa massa.

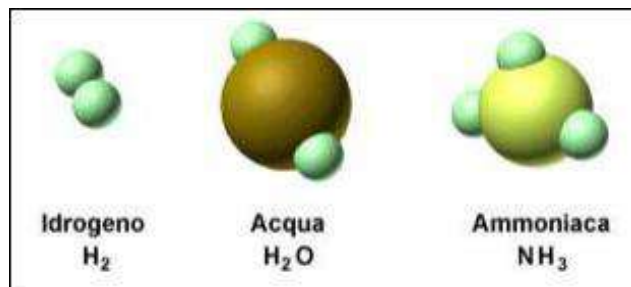


Figura1.1-Molecole

La zona centrale dell'atomo, detta *nucleo*, è infatti distinta dalla presenza di protoni, ovvero di particelle con carica positiva, e neutroni, cioè da particelle prive di carica che si interpongono ai protoni per evitare un elevato ingombro sterico. Proprio per la posizione da loro occupata, queste particelle sono dette "nucleoni" e sono dotate di un'importante massa significativa, tanto da costituire quella dell'atomo stesso.

Il numero dei protoni, inoltre, è peculiare per ogni singolo elemento.

Attorno al nucleo, ruotano all'interno di particolari regioni dello spazio nucleare, ovvero nei cosiddetti *orbitali atomici*, gli elettroni, particelle di carica negativa e di massa trascurabile.

Elemento	Simbolo	Numero protoni	Numero neutroni	Numero elettroni
Idrogeno	H	1	0	1
Carbonio	C	6	6	6
Azoto	N	7	7	7
Ossigeno	O	8	8	8
Sodio	Na	11	12	11
Zolfo	S	16	16	16
Calcio	Ca	20	20	20

Tabella 1.1-Configurazione elementi

L'insieme di queste cariche subatomiche permette di originare un atomo con una carica totale ben definita, la quale può essere neutra solo nel momento in cui protoni ed elettroni sono presenti nell'atomo in egual numero.

Nel caso contrario, si originerà un eccesso di carica totale.

Quest'ultimo tipo di atomi prende la denominazione generale di *ioni*, i quali si dividono in *anioni*, cioè atomi con una carica negativa, o *cationi*, ovvero atomi con carica positiva.

Inoltre, occorre sottolineare come gli elettroni abbiano un ruolo fondamentale nella determinazione delle relazioni fra i vari elementi, definendone sia la tipologia che il modo in cui essi avvengono.

Tali rapporti portano alla formazione della più piccola parte di una sostanza che ne mantiene le caratteristiche fondamentali, ovvero la *molecola*.

Mentre i vari elementi sono catalogati e distinti per mezzo di un proprio simbolo, formato da uno, due o tre lettere, le molecole sono espresse per mezzo di una formula, che evidenzia il numero e il tipo di atomi presenti all'interno della molecola considerata.

2 REAZIONE CHIMICA

All'interno di una reazione chimica gli stessi atomi che formano le sostanze di partenza, ovvero i reagenti, si ricombinano fra di loro dando origine a nuove sostanze, i prodotti, con caratteristiche che possono anche essere completamente differenti rispetto a quelle di partenza. Ciò avviene grazie alla rottura fra i legami che intercorrono fra i vari atomi, permettendo, in tal modo, le trasformazioni della materia.

Per rappresentare in maniera schematica una reazione chimica, si usa convenzionalmente un'equazione chimica, in cui le formule dei vari reagenti sono scritte a sinistra, mentre quelle dei prodotti a destra.

Il termine *equazione* non è casuale: indica, infatti, la trasformazione dei reagenti in prodotti senza alcun tipo di dispersione delle sostanze in esame.

Prodotti e reagenti, oltretutto, sono interconnessi per mezzo di una freccia che indica il verso di percorrenza della reazione, la quale può essere irreversibile, quindi rappresentata da una sola freccia, o reversibile, accompagnata dunque da due frecce con verso opposto.

Occorre, inoltre, ricordare come le reazioni si dividano anche in: complete, nel momento in cui i reagenti sono stati del tutto consumati, portando alla completa formazione dei prodotti, e incomplete, ovvero quando è possibile ritrovare al termine della reazione anche una piccola parte di reagenti residui.

Inoltre, all'interno di ogni tipo di reazione chimica, gli atomi sono correlati gli uni agli altri in maniera ben precisa, seguendo determinate proporzioni, le quali sono indicate

con dei numeri, i cosiddetti coefficienti stechiometrici, che precedono la formula delle sostanze che partecipano alla reazione, sia esse reagenti che prodotti.

Le reazioni chimiche avvengono naturalmente a causa dell'interazioni fra gli elettroni di valenza, cioè quelli che occupano il livello energetico più esterno, dei vari atomi, i quali cercano di giungere ad una maggiore stabilità.

Un atomo si assicura una certa stabilità grazie alla disposizione degli elettroni all'interno dei vari livelli energetici: più i livelli energetici occupati sono bassi, più l'atomo assume una maggiore stabilità, che può essere raggiunta anche attraverso il riempimento completo del livello energetico più esterno.

Per tale motivo, proprio gli atomi aventi il livello esterno incompleto tendono a reagire fra di loro, creando nuovi legami, in vario modo, e nuove sostanze, in base agli atomi in gioco e come essi si collegano fra di loro.

Una proprietà fondamentale di ciascun atomo è l'*elettronegatività*, cioè la capacità di attirare a sé gli elettroni di legame. Questa ha un valore basso fra gli atomi con pochi elettroni nell'ultimo livello, mentre è molto elevata negli atomi appartenenti al VI e al VII gruppo della tavola periodica degli elementi, poiché, avendo rispettivamente 6 e 7 elettroni di valenza, sono più vicini al pieno raggiungimento dell'ottetto.

Proprio per soddisfare tale completamento, alcuni atomi tendono a strappare gli elettroni di valenza ad atomi meno elettronegativi, mentre altri tendono a cederli.

Si può facilmente esprimere questo scambio per mezzo del *numero di ossidazione*, che definisce gli atomi che si *riducono*, cioè quelli che acquistano elettroni di valenza, e atomi che si *ossidano*, cioè quelli che perdono tali elettroni: nel primo caso il numero di ossidazione diminuisce, mentre nel secondo aumenta.

3 LA TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI

I vari elementi sono stati raggruppati all'interno di una tavola, tenendo conto delle loro configurazioni e delle loro caratteristiche fondamentali, disponendoli in maniera ben precisa e ordinata.

Gruppo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18														
	IA	IIA	IIIA	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII	IX	X	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA														
Periodo																																
1	1 H											Non metalli					2 He															
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
3	11 Na	12 Mg	Metalli di transizione										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
6	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
Elementi di transizione interna																																
Lantanidi	*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb																	
Attinidi	**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No																	

Figura3.2-Tavola periodica

Tutti gli elementi sono stati inseriti nella tavola in ordine crescente del proprio numero atomico, da sinistra verso destra, all'interno di righe orizzontali, i periodi. Tale incasellamento porta anche alla formazione di ben 8 colonne, ciascuna rappresentante di un gruppo di elementi con lo stesso numero di elettroni di valenza nel livello più esterno.

L'ottavo gruppo è quello dei cosiddetti *gas nobili*, ovvero elementi i cui atomi presentano un otetto completo. Sono, dunque, inerti e non reagiscono con gli altri atomi.

Con un'attenta analisi della tavola periodica, si può notare come gli elementi appartenenti ad uno stesso gruppo abbiano, dunque, delle proprietà simili.

All'interno della tavola periodica sono facilmente individuabili delle proprietà comuni ai vari elementi in base alla loro posizione nella tavola stessa.

Si tratta delle famose proprietà periodiche degli elementi, ovvero:

- L' **elettronegatività**, già menzionata in precedenza, la quale diminuisce dall'alto verso il basso della tavola. L'elemento meno elettronegativo è il francio, con un valore di 0,79, mentre quello più elettronegativo è il fluoro, con un valore uguale a 4;
- Il **raggio atomico**, ovvero la distanza internucleare minima fra due atomi dello stesso elemento. Essa aumenta lungo i gruppi e diminuisce lungo i periodi della tavola;

- L'**energia di ionizzazione**, cioè l'energia necessaria ad una mole di atomi allo stato gassoso per essere trasformata in una mole di cationi monovalenti. Questa aumenta lungo il periodo e diminuisce lungo il gruppo;
 - L'**affinità elettronica**, cioè l'energia liberata da una mole di atomi neutri che si trovano allo stato gassoso per trasformarsi in una mole di anioni monovalenti.
- Inoltre, è bene sottolineare come il numero di ossidazione cambi in maniera abbastanza regolare da un gruppo all'altro: è positivo nei gruppi *I* e *II*, negativo nel *VI* e *VII*, positivo o negativo nei rimanenti.

4 GENERALITÀ DELLA COMBUSTIONE

La combustione è una reazione chimica in cui una sostanza in grado di ossidarsi, cioè un combustibile, reagisce con una sostanza in grado di ridursi, ovvero un comburente: si tratta di uno scambio di elettroni con liberazione di un grande quantitativo di energia sotto forma di calore.

In queste reazioni si può notare come i reagenti abbiano più energia dei prodotti e che la differenza fra le rispettive energie sia pari al calore emanato, il quale crea un aumento della temperatura di tutte le sostanze che partecipano alla reazione, fino a permettere di giungere a dei valori tali da irradiare energia elettromagnetica con lunghezza d'onda nel campo del visibile: in tal modo si creano le cosiddette *fiamme*, ovvero zone della reazione evidenziate in maniera luminosa e ben visibile.

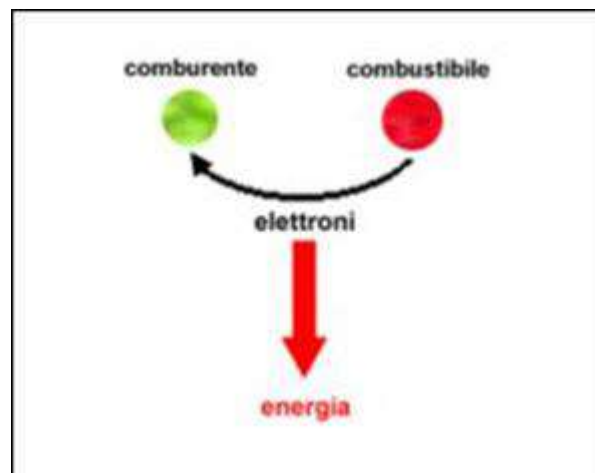


Figura 4-1 Reazione fra combustibile e comburente

Le sostanze combustibili sono spesso degli idrocarburi, cioè sostanze formate soprattutto da carbonio e idrogeno, la cui combustione è in grado di originare CO_2 e H_2O , sia allo stato gassoso che liquido, oppure monossido di carbonio (CO) se l'aria presente non è in grado di ossidare totalmente il carbonio.

Inoltre, molti altri prodotti si aggiungono a quelli di questa reazione, fra cui:

- Gas inerti, come l'azoto, o provenienti da altre sostanze organiche dopo la loro decomposizione termica. Quest'ultimi possono derivare anche da residui minerali e incombusti;
- I prodotti di reazione dello zolfo, rintracciabili in numerosi combustibili.

Tutto ciò, nel suo insieme, è indicato sotto il termine di *fumi*.

5 PROPAGAZIONE DELLA COMBUSTIONE

Combustibile, comburente e un'opportuna temperatura sono gli elementi necessari per permettere ad un incendio di propagarsi.

Molto spesso queste combustioni hanno luogo allo stato gassoso, sia per i combustibili che si trovano proprio in questo stato, sia per quelli che si mostrano liquidi o solidi: i primi, infatti, mostrano inizialmente un'evaporazione del liquido con una successiva combustione del gas, mentre i secondi subiscono dapprima una sublimazione di alcune sostanze, che prendono subito fuoco, e poi l'ossidazione del restante carbonio.

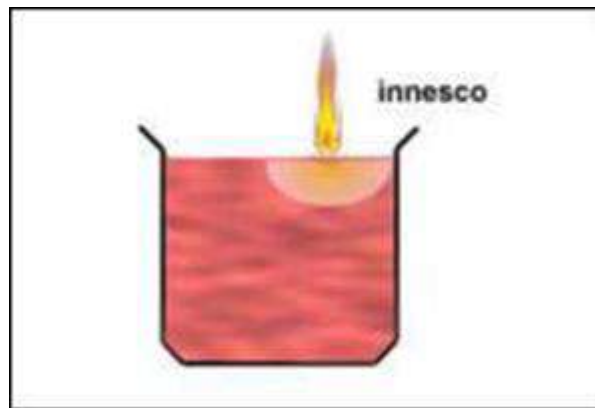


Figura 5-1 Innesco

Fondamentale è anche la temperatura, la quale aiuta la commistione fra comburente e combustibile attraverso l'innesco.

La fiamma è, inoltre, in grado di diffondersi in maniera molto veloce all'interno di un qualsiasi ambiente, grazie ad una sorta di effetto domino fra le varie reazioni di combustione: la prima reazione di ossidazione si sviluppa in un dato punto, facendo modo che il calore si propaghi fino a portare la stessa reazione anche nei punti che fanno parte delle zone limitrofe.

A causa degli innumerevoli fattori che possono interferire con questo tipo di reazione chimica, quali le dimensioni del luogo interessato dal fenomeno in questione, il tipo di gas in gioco o il rapporto nella miscela combustibile/comburente, non è possibile stabilire dei precisi parametri con cui definire la velocità di propagazione della combustione, anche se, indicativamente, si può affermare che tanto più il rapporto stechiometrico fra combustibile e comburente risulta elevato, tanto maggiore sarà tale propagazione.

Altri fattori, quali la temperatura di infiammabilità, la temperatura di accensione e il margine inferiore e superiore di infiammabilità, sono fondamentali per una corretta comprensione dell'evento.

6 TEMPERATURA DI INFIAMMABILITÀ

Per trasportare o conservare qualsiasi tipo di combustibile è importante conoscere la sua temperatura di infiammabilità, ovvero la minor temperatura possibile alla quale il combustibile in esame è in grado di emettere dei vapori, capaci di creare con l'aria una miscela infiammabile che, una volta innescata, bruci naturalmente.

Sostanza	Temperatura di infiammabilità (°C)
	Valori indicativi
Acetone	-18
Benzina	-20
Gasolio	65
Alcol etilico	13
Alcool metilico	11
Toluolo	4
Olio lubrificante	149

Tabella 6-1 Temperature d'infiammabilità

Tanto più i valori individuati sono bassi, tanto maggiore sarà la capacità di partecipare alla combustione da parte del combustibile.

Con temperature inferiori ai 20°C si fa riferimento a quelle sostanze, come alcool e benzina, molto esplosive, mentre la temperatura fra i 21°C e i 65°C risulta tipica di quelle sostanze che possono esplodere solo se riscaldate. Generalmente, i combustibili comuni, come olio combustibile, lubrificanti e gasolio, hanno una temperatura superiore ai 65°C.

Sostanza	Temperatura di infiammabilità (°C)	
	Valori indicativi	
Acetone	-18	sostanza esplosiva
Benzina	-20	sostanza esplosiva
Gasolio	65	normale combustibile
Alcol etilico	13	sostanza esplosiva
Alcool metilico	11	sostanza esplosiva
Toluolo	4	sostanza esplosiva
Olio lubrificante	149	normale combustibile

Tabella 6-2 Temperature d'infiammabilità

7 TEMPERATURA DI ACCENSIONE

Per temperatura d'accensione s'intende la minima temperatura per cui un combustibile è in grado di prendere fuoco, senza sfruttare alcun tipo d'innesco, quando è in presenza di aria.

Sostanza	Temperatura di accensione (°C)
	Valori indicativi
Acetone	540
Benzina	250
Gasolio	220
Idrogeno	560
Alcool metilico	455
Carta	230
Legno	220-250
Gomma sintetica	300
Metano	537

Tabella 7-1 Temperature d'accensione

8 ESPLOSIONE, DEFLAGRAZIONE E DETONAZIONE

Quando una reazione di tipo esotermico ha luogo in un ambiente ristretto, allora il calore sviluppato non è dissipato, portando ad un aumento della temperatura, ad una crescita della velocità di reazione e, dunque, un incremento della velocità con cui il calore stesso è prodotto, comportando una crescita illimitata della velocità della reazione: si tratta di un'*esplosione termica* con una velocissima e ben localizzata liberazione di energia, in grado di provocare numerosi risvolti meccanici.

Pressione e temperatura sono altri due fattori fondamentali nell'economia di un'esplosione, così come le proprietà della miscela infiammabile.

In accordo con il meccanismo termico inerente all'esplosione è possibile rintracciare, per una data temperatura e per una precisa composizione del sistema in esame, una pressione critica: al di sotto di questa la reazione si svolge lentamente, mentre al di sopra la reazione è esplosiva.



Tabella 8-1 Meccanismo termico

Un'esplosione può avvenire quando la miscela capace di esplodere ha una composizione entro specifici valori, chiamati limiti d'esplosività inferiore e superiore: se essa si trova fuori da questi limiti, allora la miscela reagirà lentamente e senza esplodere.

Il primo limite si riferisce alla minima concentrazione, in termini di volume, del vapore combustibile presente nella miscela, al di sotto della quale non può avvenire l'esplosione anche se in presenza d'innesco, mentre il limite superiore d'esplosività indica la massima concentrazione, sempre in termini di volume, di combustibile nella miscela, al di sopra della quale l'esplosione non avviene, anche quando è presente l'innesco.

Considerando una miscela fra acetilene ed aria, ad esempio, si può notare come questa risulti esplosiva fra i valori 3% e 53% in volume di acetilene, mentre quella fra l'aria e l'idrogeno ha dei limiti compresi fra il 10% e il 66%: si tratta, quindi, di miscele con ampi limiti.

In maniera diametralmente opposta, si possono individuare delle miscele con dei limiti ristrettissimi, come quella fra la benzina e l'aria, esplosiva fra l'1% e il 6% sempre in termini di volume di vapori del combustibile.

Tali limiti possono comunque variare attraverso la pressione e la temperatura, solitamente crescendo ad un loro aumento.

Inoltre, nel momento in cui la combustione è in grado di estendersi alla miscela infiammabile che non ha ancora preso fuoco con una velocità minore rispetto a quella del suono, allora l'esplosione è detta *deflagrazione*, mentre se la sua espansione avviene a velocità superiore a quella del suono, allora si parla di *detonazione*, le quali mostrano una distruttività di gran lunga superiore rispetto a quella delle deflagrazioni. Da un punto di vista qualitativo, inoltre, si è in grado di sostenere che:

- Un intervallo di infiammabilità molto ristretto è tipico di una reazione lenta, mentre uno molto esteso è tipico di quelle a rischio esplosione;
- Le eventualità di un'esplosione aumentano nell'intorno della combinazione stechiometrica.

Per una maggiore sicurezza, è sempre buona norma ritenere qualsiasi miscela combustibile/comburente allo stato gassoso come potenzialmente esplosiva quando presenta una composizione fissata nei limiti di infiammabilità.

9 COMBUSTIBILI

I combustibili, solitamente idrocarburi, sono sostanze capaci di reagire con l' O_2 per dare origine ad una combustione.

Grazie alla loro presenza, carbonio e idrogeno riescono a:

- Progredire calore in quantità elevatissima;
- Sviluppare una combustione completa con un rilascio bassissimo di sostanze inquinanti.

Spesso i combustibili sono classificati a STP in: solidi, presenti in quantità maggiore, liquidi e gassosi.

Un esempio importante di combustibile solido è il legno, materiale formato da cellulosa, carboidrati, lignine, resine, diverse sostanze minerali e gomme. Tutti questi elementi, i quali compongono anche i derivati del legno (carta, juta, canapa, lino, cotone, ecc), danno origine, dopo la combustione, alle cosiddette ceneri, capaci di creare fuliggini e di incidere in modo rilevante sulla corrosione, anche quando presenti in quantità minime.

Al fine di stimare la quantità di ceneri che possono essere prodotte da una combustione, è necessario riscaldare un campione polverizzato del materiale in esame in un crogiolo ad una temperatura superiore agli 850°C.

Questi materiali possono originare una fiamma più o meno viva, oppure possono bruciare senza originarle o carbonizzarsi in maniera lento o veloce a seconda delle variabili che determinano la combustione, i quali possono variare anche con particolari trattamenti, come la pittura.

Il legno prende fuoco ad una temperatura che si aggira attorno ai 250°C, anche se, quando il legno è a contatto con superfici calde per un lasso di tempo abbastanza lungo, può avvenire la carbonizzazione, **comportando anche un'eventuale combustione naturale a temperature notevolmente inferiori.**

Il rapporto fra volume del legno e superficie esterna, prende il nome di pezzatura, una proprietà rilevante di questo materiale. Maggiore è la pezzatura di un combustibile, minore è la porzione della sua superficie a contatto con l'aria, presentando anche una massa tale da poter dissipare il calore fornitogli in maniera più efficiente: è per questo motivo che un pezzettino di legno si brucia più facilmente rispetto ad uno più grande.



Figura 9-1 Esempi di pezzatura

Quindi più le particelle che compongono i combustibili liquidi o solidi sono piccole, più il calore necessario per originare la combustione sarà basso, tenendo sempre conto di un eventuale raggiungimento della temperatura di accensione: uno stesso materiale può, dunque, risultare più o meno pericoloso a seconda della propria pezzatura.

Il legno possiede una bassa conduttività e, di conseguenza, una velocità di propagazione della combustione molto lenta.

Per i motori e gli impianti di riscaldamento sono utilizzati quei combustibili con il maggiore potere calorifico per unità di volume, ovvero i combustibili liquidi, che possono essere suddivisi in artificiali, pochi e non rilevanti, e naturali, fra cui i petroli, una miscela di idrocarburi allo stato liquido, gassoso o solido.

Il greggio, ovvero il petrolio grezzo, è trasportato con vari sistemi fino alle cosiddette raffinerie, dove è lavorato per ottenere vari derivati. Solitamente, il greggio è distillato in modo frazionario, con una prima distillazione ad ampi intervalli di temperatura, per poi diminuire sempre di più tali intervalli al fine di ottenere diversi prodotti, come la benzina, il gasolio, il cherosene o il gas di raffineria.

Al termine della distillazione si ottengono due residui:

- Il bitume, un residuo solido, impiegato soprattutto per la pavimentazione delle strade;
- Gli oli pesanti, ovvero la porzione liquida, solitamente trasformati in benzina con dei sistemi specifici, quali il *cracking*.

Fra i vari prodotti, uno dei più utilizzati, soprattutto per il suo largo impiego nei motori a scoppio, è sicuramente la benzina, la quale è ottenuta con una distillazione fra i 60°C e i 200°C.

Il cherosene, invece, è distillato fra i 160° e 270°C ed è largamente impiegato nei riscaldamenti domestici, mentre il gasolio (250° e 340°C) trova un vasto uso nei motori Diesel.

Generalmente, i combustibili liquidi si trovano in equilibrio con i propri vapori, originati in vario modo sulla superficie che separa il mezzo liquido da quello che si trova subito sopra.

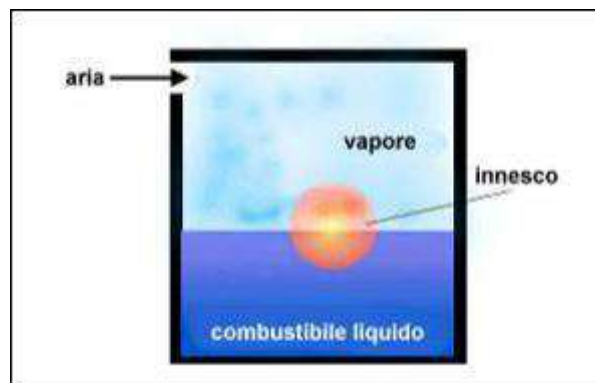


Figura 9-2 Equilibrio fra il combustibile liquido e il proprio vapore

La combustione dei liquidi infiammabile quando i vapori e l'ossigeno dell'aria si mischiano fra di loro in maniera idonea, rispettando anche il campo di infiammabilità.

Un liquido infiammabile, dunque, brucia quando passa dallo stato liquido a quello gassoso.

In base alla temperatura di infiammabilità, i combustibili liquidi possono essere classificati in tre tipi di categorie:

- A: ovvero i liquidi con temperatura d' infiammabilità al di sotto dei 21°C;
- B: cioè i liquidi che hanno una temperatura d'infiammabilità fra i 21°C e i 65°C;
- C: i liquidi con una temperatura che permette la combustione fra i 65°C e i 125°C.

I limiti d'infiammabilità, la temperatura d'accensione, la densità dei vapori, la viscosità e le temperature di accensione e infiammabilità sono variabili importanti per i vari combustibili liquidi.

Inoltre, tutti i liquidi con una temperatura di infiammabilità al di sotto di quella ambiente sono estremamente pericolosi, poiché tanto più bassa è tale temperatura, tanto è più probabile l'eventualità che si creino dei vapori capaci di prendere fuoco, dunque questi sono in grado di prendere fuoco anche senza un incremento della temperatura.

Ovviamente, fra due liquidi di questo tipo, è preferibile utilizzare quello con una temperatura d'infiammabilità più alta, in modo da diminuire il rischio d'incendio.

Per quanto concerne l'eventualità dell'incendio, vi sono vari elementi negativi, fra cui: un ampio campo d'infiammabilità, poiché con un intervallo più esteso è più probabile una miscela vapore-aria tale da poter prendere fuoco, e una temperatura di accensione del liquido bassa, dal momento che ciò implica un'energia di attivazione della combustione minore.

Bisogna inoltre ben considerare come i combustibili più pericolosi siano quelli più pesanti presenti nell'aria, poiché riescono ad accumularsi facilmente quando la ventilazione è scarsa o assente, ristagnando nelle zone più basse dell'ambiente.

Oltretutto, occorre considerare la densità dei vapori infiammabili, ovvero la massa per unità di volume dei vapori appartenenti al combustibile.

Gli idrocarburi allo stato gassoso, come il metano, largamente utilizzato nelle cucine, oppure l'etano, il propano e il butano, quest'ultimo impiegato soprattutto nelle bombole dei fornelli da campeggio, sono fra i più importanti combustibili allo stato gassoso.

Poiché miscelare questi combustibili con l'aria è estremamente semplice, grazie alla loro purezza, sono eccellenti per il processo di combustione, anche perché prendono fuoco senza originare fumi o sostanze incombuste, anche se, in carenza di ossigeno, producono significative quantità di CO .

Questi combustibili sono, oltretutto, estremamente facili da trasportare e possono essere distribuiti con allacci diretti fra le abitazioni e la rete delle varie società del gas: tutto ciò evita un loro rischioso deposito, a cui si aggiunge un maggiore possibilità di regolare il flusso del gas e, dunque, il calore prodotto.

Passando in rassegna i vari combustibili gassosi, sicuramente occorre avere un occhio di riguardo per il metano, che, oltre ad essere diffusissimo nel sottosuolo di tanti Paesi, fra cui l'Italia, è spesso associato a giacimenti di petrolio. In questi casi, i costi di una sua estrazione sono talmente sconvenienti da indurre a incendiarlo prima di iniziare ad estrarre il petrolio.

L'idrogeno, invece, è da annotare come un importantissimo combustibile gassoso di tipo artificiale, ottenuto con l'idrolisi dell'acqua. Amico della natura, la sua combustione comporta la sola formazione di H_2O , motivo per cui è oggi oggetto di numerosi studi sul suo impiego.

I limiti di infiammabilità, la densità dell'aria e la temperatura di accensione sono fondamentali per la combustione dell'idrogeno.

È possibile, inoltre, suddividere i gas in leggeri e pesanti: i primi hanno una densità inferiore di 0,8 rispetto alla densità dell'aria, mentre quella dei secondi, i quali tendono a stratificare e a rimanere nella parte più bassa dell'ambiente, è di 0,8 superiore rispetto a quella dell'aria.

10 ESPLOSIVI

Alcune sostanze sono in grado di diventare velocemente gas ad altissima temperatura quando si presentano alcune influenze esterne, fino a raggiungere un volume più grande rispetto a quello che avevano inizialmente: si tratta degli *esplosivi*, capaci di originare una reazione violentissima, detta *esplosione*, accompagnata da alcuni caratteristici fenomeni di tipo fisico, fra cui la luce, lo spostamento dei materiali e il suono.

La liberazione di un grande quantitativo di energia in un lasso di tempo brevissimo permette di conferire alle esplosioni la propria peculiare distruttività: mentre le normali combustioni avvengono nel giro di alcuni minuti o secondi, le detonazioni avvengono nell'ordine dei millesimi di secondo e le deflagrazioni nel giro in qualche secondo o anche meno.

La presenza, all'interno dello stesso esplosivo, di O_2 , in quantità utili ad ossidare parzialmente o completamente i reagenti, permette di avere delle reazioni così veloci.

Eppure, molte sostanze esplosive, poste al di fuori dei propri limiti di esplosività, sono solite prendere fuoco senza esplodere.

Il quantitativo di ossigeno, in eccesso o in difetto rispetto a quello utile per la combustione di tutto C e di tutto H_2 , all'interno dell'esplosivo in esame prende il nome di **bilancio di ossigeno**, indicato con una percentuale positiva, quando l'ossigeno è eccedente, o negativa, se è in deficit.

Un esplosivo è detto *completo* nel momento in cui è costituito da un unico composto chimico e possiede un bilancio di O_2 positivo.

Alcune delle proprietà fondamentali di un esplosivo sono:

- **Stabilità**, dunque l'attitudine degli esplosivi a rimanere inalterati nel tempo, caratteristica molto influenzata dalla struttura chimica dell'esplosivo e dalle materie prime che sono state usate per fabbricare, ma anche dalla loro conservazione, dalla luce, dal calore, da eventuali corpi estranei e dall'umidità. Se un esplosivo possiede una bassa stabilità, può facilmente originare un'esplosione, pertanto la stabilità di qualsiasi materiale esplosivo deve essere tenuta sotto controllo sia durante la fabbricazione che durante la conservazione.

- **Calore di esplosione**, ovvero il calore, misurato in kJ/kg o in kcal/kg, che si libera dall'unità di massa di un esplosivo. Può essere definito come il lavoro massimo un esplosivo può fornire tramite l'esplosione di un chilo di esso;

Esplosivo	Calore di esplosione(kJ/kg)
Nitroglicerina	6610
Polvere nera	2900
Tritolo	3980

Tabella 10-1 Calore di esplosione

- **Temperatura di esplosione**, vale a dire la temperatura raggiunta nel mentre dell'esplosione. Nella seguente tabella sono state calcolate in modo matematico alcune di queste temperature, anche se quelle reali sono inferiori a quelle qui presenti, dal momento che una porzione del calore dell'esplosione è ceduto per irraggiamento o conduzione;

Esplosivi	Temperatura di esplosione °C
Nitrato di ammonio	1120
Polvere nera	2770
Fulminato di mercurio	3530
Tritolo	2190
Nitroglicerina	3470

Tabella 10-2 Temperatura di esplosione

- **Forza (o pressione) specifica**, che può essere considerata come quella più importante dal punto di vista pratico, anche perché utilizzata per confrontare l'effetto dei vari esplosivi. Si tratta della pressione, espressa in bar, che è esercitata da un chilogrammo di esplosivo quando esplose nel volume di un litro. È definita per mezzo di manometri a schiacciamento;

Esplosivo	Forza specifica (1 litro * bar)
Nitroglicerina	10200
Nitrato d'ammonio	5185
Tritolo	8100
Polvere nera	3000

Tabella 10-3 Forza specifica

- **Densità di caricamento**, ovvero il rapporto, misurato in kg/dm³, fra la massa dell'esplosivo considerato ed il volume della cavità in cui l'esplosivo è contenuto all'inizio. Ogni esplosivo ha una propria densità limite di caricamento, che una volta superata, nel mentre dell'esplosione, sviluppa una pressione tale da distruggere qualsiasi contenitore di qualsiasi resistenza;
- **Sensibilità**, cioè la capacità di decomporsi in modo più o meno facile sotto l'influsso di un'azione esterna, caratteristica che dipende soprattutto dalla natura chimica dell'esplosivo in esame, anche se può sempre cambiare con il variare della struttura, dell'umidità o dello stato fisico. Persino l'innesco da utilizzare cambia a seconda della sensibilità propria dell'esplosivo: per alcuni basterà anche un piccolo urto, mentre per altri ci vorrà un innesco molto più violento.

Quest'ultima è ulteriormente suddivisa in:

- Sensibilità all'innesco, misurata esponendo l'esplosivo, posto in alcune cartucce, all'azione di capsule con una potenza via via sempre maggiore, fino a determinare la capsula che produce l'esplosione completa;
- Sensibilità allo sfregamento, definita da un cilindro di porcellona ruvida che esercita una pressione misurabile su di una placchetta di uguale materiale, sulla quale è adagiata una minima quantità della sostanza in esame, solitamente 10 mm³;
- Sensibilità all'urto, espressa considerando il peso in kg del grave utilizzato e l'altezza in centimetri della caduta utile ai fini dell'esplosione.

Molto importante è anche il volume che un chilogrammo dell'esplosivo può originare, vale a dire il cosiddetto volume specifico. Per creare un confronto fra i diversi esplosivi, si fa riferimento all'unità di massa l/kg.

Alcuni esempi di valori del volume specifico, calcolati a 15°C e a pressione atmosferica, sono riportati nella seguente tabella.

Esplosivo	Volume (litri / kg di gas)
Polvere nera	285
Nitroglicerina	752
Nitrato d'ammonio	937

Tabella 10-4 Volume

Dal momento che un qualsiasi di gas occupa un valore direttamente proporzionale alla temperatura a cui si trova, se durante un'esplosione si libera un'elevata quantità di calore, allora i prodotti della combustione occuperanno anche un volume maggiore.

Oltretutto, gli esplosivi sono anche distinti sia a seconda della velocità con cui la reazione di combustione si estende nella massa dell'esplosivo stesso, permettendo un'accurata classificazione in: esplosivi dirompenti, detonanti (o innescanti) e deflagranti (o propellenti), sia a seconda della loro struttura chimica, che li differenzia in gassosi e chimici.

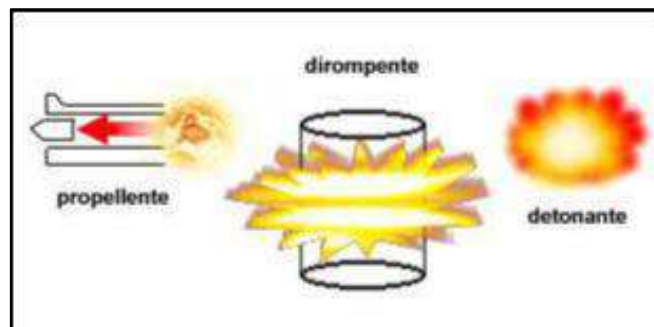


Figura 10-5 Tipologie di esplosivi

Un esplosivo gassoso è formato da numerose sostanze che generalmente non hanno attitudine esplosiva, ma che, interagendo fra di loro, si dividono fra quelle che agiscono come comburenti e quelle che agiscono come combustibili.

Del tutto differente è un esplosivo chimico che, invece, può essere organico, come il tritolo o le nitroglicerine, oppure inorganico, come il clorato di potassio. I primi possiedono una molecola con tutti gli elementi sufficienti e necessari ad una combustione più o meno completa. A causa della presenza al loro interno di molecole di ossigeno, le quali ossidano il carbonio e l'idrogeno al loro interno, possono originare un'esplosione molto più violenta se mescolati.

Gli esplosivi deflagranti, detti anche propellenti, producono una reazione lenta con un'azione soprattutto di spinta, che trova un importante impiego nei razzi, nella pirotecnica e nelle armi da fuoco. Questa deflagrazione, infatti, crea una reazione di decomposizione veloce e graduale, che si estende da un punto all'altro dell'esplosivo: se l'esplosivo in esame è all'interno, per esempio, di una camera a scoppio di una qualsiasi arma, la deflagrazione comporta un aumento della pressione in maniera molto graduale, generalmente allargando il contenitore in cui è rinchiuso, piuttosto che rompendolo. Proprio per questo motivo questi esplosivi sono detti *propellenti*, come nel caso della polvere nera, dal momento che sono in grado di spingere il proiettile in canna verso l'esterno.

Altra tipologia di esplosivi è quella dei dirompenti, i quali reagiscono subitaneamente solo quando sono in presenza di un'opportuna energia esterna. La loro detonazione ha velocità molto elevate, con un'azione istantanea dei gas prodotti e un aumento di pressione tale da distruggere i recipienti che li contengono, come nel caso della nitroglicerina e del tritolo.

Completamente diversi dalle altre tipologie di esplosivi, sono quelli detonanti, detti anche innescanti, anche a causa della loro elevatissima sensibilità: un urto o uno sfregamento sono sufficienti per innescarli e per trasmettere la loro detonazione agli altri esplosivi, così come testimoniano la pentrite, il fulminato di mercurio e l'azotidrato di piombo.

11 ESPLODIBILITÀ DI POLVERI

Una delle caratteristiche fondamentali per determinare l'infiammabilità dei combustibili solidi è il loro livello di polverizzazione, ovvero la pezzatura, la quale aumenta la superficie esposta all'aria e, così, la suscettibilità della reazione. Esattamente come nel caso dei gas infiammabili, anche per le nubi di polveri dei vari combustibili, si può affermare che più le dimensioni delle particelle che le compongono sono minute, maggiore sarà la loro pericolosità.

Le polveri formate da particelle di solo 420 μm si possono definire esplosive e, quindi, capaci di incendiarsi con un semplice innesco.

La concentrazione limite d'infiammabilità e la temperatura di accensione caratterizzano anche le polveri: per la prima ha un interesse puramente pratico solo il limite inferiore, mentre più le temperature di accensione sono basse, più le polveri possono risultare estremamente pericolose.

La minima energia richiesta per permettere l'accensione di una polvere prende il nome di *energia minima d'attivazione*, un altro importante fattore da annoverare fra quelli d'interesse, come anche l'umidità del materiale e l'umidità relativa dell'aria, utili per ridurre l'eventualità di esplosioni. Se nella polvere, infatti, aumenta l'umidità, aumenta

di conseguenza anche la temperatura necessaria per permettere l'accensione, riducendo anche la pressione che sarebbe generata da un'esplosione, poiché l'umidità, evaporando, è in grado di ridurre l'energia distruttiva libera ed imprigionare il vapore, oltre ad evitare un accumulo delle cariche elettrostatiche nelle nubi delle polveri.

Proprio in tali nubi, è possibile diminuire la concentrazione delle polveri per mezzo di alcuni impianti di ventilazione, dando molta attenzione ad eventuali pericolosi accumuli delle polveri nelle condotte.

Nel mezzo delle loro lavorazioni, dunque, le polveri più pericolose possono essere miscelate con delle polveri inibitrici, come nel caso di quelle utilizzate negli estintori, quali potassio e carbonati di sodio, oppure inerti.

Natura della polvere	Tipo di polvere	Minima energia di attivazione (joule)	Massima pressione di esplosione (bar)	Velocità di accrescimento della pressione media (bar/s)
Polveri metalliche	Alluminio atomizzato	0,050	5,1	562
	Magnesio	0,080	6,0	253
	Stagno	0,08	2,6	59
	Cromo	0,140	5,9	91
Polveri di materie plastiche e sintetiche	Polietilene a bassa pressione	0,06	5,8	78
	Resine epossidiche	0,015	6,0	140
	Nylon	0,020	6,0	85
	Gomma sintetica	0,03	6,5	78
Polveri di prodotti agricoli	Farina di grano	0,06	6,4	98,4
	Polvere di mais	0,04	6,7	119,5
	Zucchero in polvere	0,03	6,4	119,5
	Cacao	0,03	4,8	77,3

Tabella 11-1 Caratteristiche delle polveri

12 DINAMICA DEGLI INCENDI

Fra i fattori di maggior importanza per quanto riguarda la propagazione e lo sviluppo di un qualsiasi tipo d'incendio vi sono:

- **Compartimento;**
- **Carico d'incendio;**
- **Velocità di combustione;**
- **Ventilazione.**

Compartimento

Si tratta del settore di un edificio racchiuso entro certi elementi costruttivi, utili ad impedire la diffusione dell'incendio, ma anche di fumi e di trasmissioni termiche ai

settori limitrofi, per un lasso di tempo prefissato. Tutti quegli elementi costruttivi che delimitano questo settore si chiamano elementi di chiusura. Se tali elementi non sono presenti, allora si considera tutto l'edificio come un unico grande elemento di chiusura. Ogni compartimento ha un'ampiezza massima, la quale dipende dalla destinazione, dai mezzi di rivelazione e segnalazione, dal carico d'incendio e dai sistemi di spegnimento automatici che sono presenti.

Carico d'incendio

È il quantitativo di calore, indicato con Q , che si dovrebbe sviluppare da una combustione completa dei materiali contenuti nel compartimento, considerando anche gli infissi, le strutture, le opere di finitura dei muri, soffitti e pavimenti. Questo fattore si basa sulla quantità e qualità del materiale in esame, anche se la quantità di calore stimata, a causa di numerosi fattori, è ben lontana da quella reale.

Nell'originare un incendio all'interno di un edificio, l'energia d'attivazione è, spesso, non molto elevata, mentre alcuni eventi accessori, quali imprudenza, ignoranza o negligenza, possiedono molte volte un ruolo chiave.

Al principio di un qualsiasi incendio, vi è sempre la fase di ignizione, ovvero il momento in cui un materiale combustibile riesce a ricevere del calore in quantità utile per aumentare la propria temperatura, arrivando ad un valore sufficiente per la combustione, la quale, dopo il suo inizio, continua in maniera completamente indipendente rispetto ai vari apporti energetici che possono provenire dall'esterno.

La temperatura che permette il proseguo della combustione è detta *energia di ignizione*, mentre l'energia assorbita dal materiale combustibile prende il nome di *temperatura d'ignizione*. Se non è possibile alcun tipo di propagazione, la combustione finisce.

Se, invece, un combustibile si trova ad una distanza opportuna dagli altri materiali combustibili, vi è una propagazione dell'incendio, causata da una pirolisi dei vapori e dei gas, che prendono immediatamente fuoco.

L' O_2 iniziale è sufficiente per l'ignizione, ma spesso la temperatura dei combustibili non raggiunge alcun livello critico su un volume utile e la combustione smette dopo poco tempo, questo a causa di un calore svolto inferiore a quello dissipato, che porta ad una diminuzione delle temperature d'inflammabilità. La combustione può continuare o cessare a seconda del bilancio termico: se è positivo, ovvero vi è una maggiore quantità di calore generato più che disperso, allora la combustione continua, viceversa avremo un valore negativo e la combustione finirà, entrando dapprima all'interno di un processo che è possibile definire di *autoestinzione*.

La durata della combustione è, dunque, regolata da una serie di bilanci energetici subitanei: aumentando la temperatura, si aumenta anche la produzione e la perdita del calore.

Solitamente, in un incendio si distinguono:

- **Una fase iniziale**, la più instabile, compresa fra lo spuntare della prima fiamma fino al *flash over*, detto anche infiammazione generalizzata;
- **Una fase a velocità di combustione costante**, che va dal flash over al momento di picco della temperatura media;
- **Una fase di estinzione**, compresa fra il valore massimo della temperatura media e l'estinzione completa dell'incendio, la quale è ritenuta completa nel momento in cui la temperatura media è di circa 300°C.

La fase iniziale è;

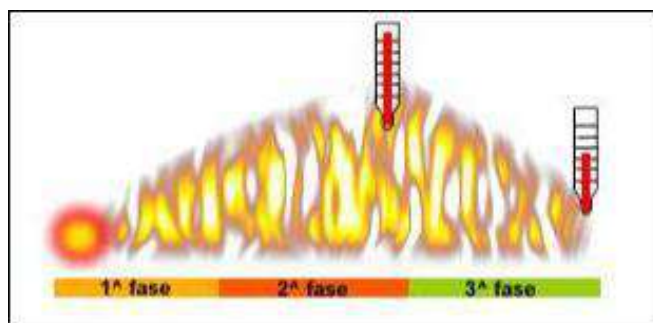


Figura 12-1 Fasi dell'incendio

Lo sviluppo di un incendio può svilupparsi anche a causa di numerosi altri eventi, come la rottura, attorno ai 100°C delle finestre, oppure la combustione di rivestimenti o mobili, i quali sono ottimi combustibili, in grado di propagare le fiamme per convezione e irraggiamento.

In questa fase le temperature oscillano continuamente, facendo comunque crescere in maniera abbastanza rapida la temperatura media.

La prima fase, fondamentale per lo sviluppo dell'incendio, si può suddividere in tre differenti stadi.

Il **primo stadio**, cioè l'inizio dell'ignizione, dipende da numerosi fattori, quali:

- Possibilità di propagazione della fiamma;
- Dispersione del calore nel combustibile ventilazione dell'ambiente;
- Infiammabilità del combustibile;
- Grado di partecipazione al fuoco del combustibile;
- Caratteristiche superficiali del combustibile;
- Geometria e volume degli ambienti.

L'inizio dello stadio di ignizione avviene quando un oggetto combustibile si trova molto vicino rispetto ad una sorgente di calore. Le caratteristiche di questa fase, inoltre, variano a seconda del livello d'infiammabilità dei materiali in gioco.

Affinché un combustibile prenda fuoco, è importante che sia capace di rilasciare un vasto volume di vapori e gas infiammabili in un breve lasso di tempo, altrimenti la sorgente termica non riuscirà a far avvenire l'ignizione.

Dato che la quantità di ossigeno è spesso sufficiente per le reazioni che avvengono all'inizio, il continuo dell'ignizione non è quasi mai dipendente dalla quantità d'aria presente nel compartimento.

Dal momento che l'aumento della temperatura media provocato da questa fase assume valori non elevati, solo dei sensori a ionizzazione sono in grado di percepire il principio d'incendio.



Figure 12-2 Rilevatori di fumo

Per quanto riguarda il secondo stadio, ovvero quello della propagazione, si può affermare come questo sia definito dalle seguenti caratteristiche:

- Riduzione della visibilità a causa dei fumi di combustione;
- Produzione di gas tossici e corrosivi;
- Aumento delle energie di irraggiamento;
- Aumento della partecipazione alla combustione dei combustibili solidi e liquidi;
- Aumento rapido delle temperature.

In tale stadio vi è il coinvolgimento di altri elementi combustibili, come i rivestimenti delle pareti o i mobili, che determinano, per mezzo delle loro caratteristiche, l'evoluzione dell'incendio.

La combustione progredisce anche in relazione alla natura e all'inerzia termica dello strato prossimo allo strato superficiale.

Nel momento in cui il calore fornito non permette alcuna propagazione dell'incendio, questo tenderà naturalmente ad estinguersi.

Al verificarsi di un bilancio positivo, invece, la combustione continuerà il suo percorso, provocando un aumento della temperatura nel compartimento e un incremento della velocità della reazione, a meno che non vi sia una ventilazione che non permetta una quantità di ossigeno sufficiente a tale scopo.

Si evidenzia, dunque, come la propagazione e lo sviluppo dell'incendio non sia regolare.

Tale fase è seguita dal **terzo stadio**, le cui caratteristiche si possono individuare in altri fattori, quali:

- Forte aumento di emissione di gas e di particelle incandescenti;

- I combustibili vicino al focolaio sono soggetti ad autoaccensione, quelli più lontani si riscaldano fino a raggiungere la temperatura di combustione con produzione di gas di distillazione infiammabili;
- Crescita esponenziale della velocità di combustione;
- Brusco incremento della temperatura.

Il **terzo stadio** viene diviso in:

- **Stadio 3a**
- **Stadio 3b**

Lo **stadio 3a** comporta una propagazione dell'incendio e la formazione di fiamme tali da raggiungere il soffitto, verso il quale si può individuare un accumulo dei fumi caldi e dei vari gas prodotti dall'incendio. Si registra un brusco aumento della temperatura, ma non tale da permettere la combustione spontanea degli altri combustibili presenti. Nel caso di una ventilazione adeguata, l'incendio riesce facilmente a propagarsi, mentre gas e fiamme irradiano verso tutte le direzioni del compartimento energia termica, la quale ha come bersagli principali il pavimento e gli eventuali oggetti presenti: si giunge ad una fase in cui la temperatura è tale da rendere improbabile una qualsiasi forma di autoestinzione.

Lo **stadio 3b**, invece, mostra una velocissima propagazione delle fiamme, le cui temperature raggiungono e superano i 500°C, con conseguente incendio del restante materiale combustibile a causa del calore ricevuto per convezione o irraggiamento. Si verifica un continuo aumento della temperatura, fino a superare i 600°C, con emissione di gas infiammabili dai vari materiali combustibili.

In questo modo l'incendio si sviluppa sempre di più: si è ormai raggiunto lo stadio di infiammazione generalizzata o di flash over.

Nel momento in cui il locale non si dimostra adeguatamente ventilato, l' O_2 diminuisce e non si verifica la completa combustione nel compartimento: così i gas incombusti escono dalle finestre dell'edificio, dando luogo ad ulteriori fiamme sulla sua facciata nel momento del loro incontro con l'ossigeno presente all'esterno.

Il flash over, invece, può essere considerato come il punto di non ritorno: una volta raggiunto l'incendio si spegnerà solo al termine della combustione di tutto il materiale combustibile presente all'interno.

Riassumendo, si potrebbe dire che durante flash over:

- Si giunge al punto in cui le temperature nel locale iniziano a tendere all'uniformità;
- Compaiono contemporaneamente numerosi fenomeni;
- La combustione accelera richiedendo un elevato volume di ossigeno;

- I fuochi aumentano la loro intensità;
- Ha luogo il momento in cui il gas nei pressi del soffitto inizia a raggiungere temperature medie attorno ai 600°C;
- L'intensità del calore assume un valore di irraggiamento e convezione equivalente a 1,25 W/cm², ovvero al limite inferiore d'infiammabilità dei vari materiali costituiti da cellulosa;

Solitamente, il flash over avviene quando la temperatura media si aggira attorno ai 600°C, dunque dai 3 ai 30 minuti dall'ignizione.

Infine, si registra la **fase del vero e proprio incendio**, in cui i materiali combustibili continuano a sviluppare elevate concentrazioni di gas infiammabili, mentre si hanno temperature abbastanza elevate e un'emissione considerevole di calore.

Nel locale la temperatura non è più uniforme, con le zone inferiori che iniziano a registrare temperature inferiori rispetto a quelle del soffitto e delle parti superiori delle pareti.

Si ha una potenza termica dipendente dalla velocità della combustione, la quale è, invece, in relazione con la portata dell'aria entrante e con il calore originato dalla combustione.

Circa il 60% della potenza termica è eliminata con i gas di scarica, mentre il 10% è irradiato verso l'esterno dell'edificio passando per le sue finestre. Infine, il 30% si accumula nei pressi dei pavimenti, dei soffitti e delle pareti.

Una serie di eventi, quali la diminuzione della densità dei gas combustibili, a causa della dilatazione termica dovuta alla temperatura, e la variazione di pressione fra l'interno e l'esterno dell'edificio, portano ad una fuoriuscita dei gas combustibili dal limite superiore delle finestre, mentre vi è il richiamo di aria fresca dalla zona più bassa dell'edificio, che si dimostra in depressione rispetto alla parte più elevata.

La temperatura diminuisce in maniera irregolare, mentre il calore permane per lunghi periodi, anche in funzione di vari fattori, come la ventilazione e le caratteristiche termiche del locale, oppure al da salto termico che si registra fra la temperatura superficiale e quella del gas nell'edificio.

Quest'ultima fase è estremamente rilevante, soprattutto per la distribuzione della temperatura della facciata e per la diminuzione delle temperature interne grazie al sopraggiungere di aria fresca dall'esterno dell'edificio, mentre una notevole potenza termica si disperde per irradiazione dalle finestre.

Si giunge al termine di questa fase una volta che le temperature medie raggiungono i 300°C.

Analizzando alcune caratteristiche con cui si propagano gli incendi, si può affermare che le correnti di fumo che si verificano nella zona della combustione aiutano la propagazione stessa attraverso:

- Gli effetti camino, che si verificano con lo stabilizzarsi delle temperature e che provocano un movimento dei fumi per tiraggio, il quale ha bisogno di scale, cave d'impianti, ascensori e simili, per rendersi evidente;
- Il vento, che può muovere il fumo in varie direzioni, sia verticalmente, ma, soprattutto, orizzontalmente;
- L'espansione termica dell'aria, che si registra con l'aumentare della temperatura, fenomeno che comporta la rottura delle porte e delle finestre dell'edificio;
- Un funzionamento inadatto della ventilazione meccanica, con un velocissimo spostamento dei fumi e del calore che si trovano all'interno dell'edificio in esame: proprio per tale motivo, nasce la necessità di sistemi di arresto automatici degli impianti di ventilazione e di serrande tagliafuoco. Tuttavia, questi impianti possono anche essere integrati nella sicurezza e nella protezione dell'edificio dall'incendio, progettandoli al fine di espellere i vari fumi verso l'esterno dell'edificio.

Inoltre, la propagazione dell'incendio può avvenire sia per convezione che per conduzione: a causa dell'evidente continuità che vi può essere all'interno di un qualsiasi edificio, se il calore si propaga efficacemente attraverso le solette e le pareti, si può raggiungere una temperatura idonea all'accensione dei combustibili presenti nei locali, anche senza il contatto diretto con le fiamme.

L'irraggiamento termico, invece, permette il passaggio del calore dalla sorgente al ricevitore in modo elettromagnetico. Così facendo, la potenza che viene irradiata diminuisce con il quadrato della distanza, producendo un irraggiamento molto più pericoloso nei confronti dei corpi limitrofi.

Infine, non tutta la superficie di un edificio irradia in egual modo durante un incendio: mentre alcune zone sono meno pericolose, quali le pareti, altre sono estremamente rischiose, come, ad esempio, le aperture.

ANALISI TERMICA

L'incendio è un fenomeno molto complesso, spesso originato in maniera casuale, che si verifica in un luogo non allestito per un simile evento: si tratta di una combustione che avviene al cospetto di O_2 , tenuta viva da elementi infiammabili di qualsiasi tipo.

Tale evento, estremamente pericoloso, ha la capacità di eludere il controllo umano, a seconda delle proprietà del luogo in cui si sviluppa e dalle proprietà, oltre che dal numero, dei materiali infiammabili che vi sono al suo interno. Essendo un fenomeno estremamente distruttivo, è in grado di apportare gravi danni all'ambiente che lo circonda, oltre che a cose e persone.

1 SVILUPPO DI UN INCENDIO

Come già esplicitato nel precedente capitolo, si è in grado di chiarire l'evoluzione dell'incendio per mezzo di un'analisi delle temperature nel lasso di tempo in cui esso avviene.

Dunque, si possono individuare vari momenti, fra cui:

- L'iniezione, ovvero l'inizio della combustione, che qui risulta instabile e dipendente dal bilancio termico dell'incendio;
- Il pre-flashover, in cui l'incendio tende ad aumentare spontaneamente le sue dimensioni e le temperature raggiunte;
- Il flashover, in cui le temperature si stanziavano omogeneamente fra i 500°C e i 600°C , definito anche come la fase in cui si registra una potenza radiante di circa 20 KW/m^2 al livello del pavimento della struttura in esame;
- L'incendio generalizzato, in cui oramai le fiamme avvolgono interamente tutto il materiale combustibile presente nell'edificio;
- La graduale estinzione dell'incendio, che può essere definita tale nel momento in cui le sue temperature medie si aggirano attorno a temperature inferiori ai 300°C .

Il flashover

La combustione dei gas, situati nelle zone più alte di un immobile, prende il nome di *flashover*, il quale corrisponde al primo punto di flesso della curva.

Con riferimento alla *Norma NFPA101: Life safety code 3.3.79*, si può affermare che la “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”.

Al fine di acquisire, dunque, gli opportuni presupposti di un *flashover*, la conflagrazione deve avvenire in un ambiente semichiuso o chiuso, oltre che in presenza di materiali infiammabili, capaci di permettere l'estensione dell'incendio su tutta la superficie libera.

Al divampare dell'incendio in un compartimento non ventilato, inoltre, si arriverà ad un graduale incremento della temperatura, causata dal progredire del calore non disfatto verso l'esterno, creando enormi quantitativi di gas combustibili e di fumi. Nel preciso istante in cui la concentrazione di ossigeno nel locale aumenta, per mezzo di una sua reintroduzione nell'ambiente, si avrà una conflagrazione tale da far verificare un'esplosione: si tratta della celebre *fiammata di ritorno* o *backdraft*.

2 SCENARI DI INCENDIO

Un progetto strutturale d'ingegneria antincendio deve, in primo luogo, circoscrivere un'adeguata condizione d'incendio di progetto.

Conseguentemente, occorre tener conto della combustione nei vari compartimenti dell'edificio, fissando le circostanze di maggiore rilievo per il progetto.

In funzione dello scenario d'incendio preso come punto di riferimento, si statuisce l'incendio di progetto da utilizzare.

Attraverso la considerazione dei parametri fisici specifici dell'edificio, che prevedono complesse procedure di calcolo, ma anche per mezzo di un accostamento prestazionale, fondato su dati provenienti da metodi di prova, si è in grado di fissare le azioni termiche su cui far fede nelle seguenti analisi della struttura a caldo.

L'ingegneria antincendio, avvalendosi di apposite metodologie di calcolo automatico, permette la simulazione di un incendio, con una conseguente valutazione della sicurezza dell'edificio. Oltretutto, dal momento che i risultati della prova sono condizionati dall'oggetto studiato, ne sarà necessario uno capace di creare delle condizioni empiriche ai fini del calcolo.

L'esposizione termica può essere illustrata per mezzo di tre prototipi:

- L'esposizione parametrica, la quale usufruisce delle proprietà fisiche uniformi della struttura in esame come criteri iniziali;
- L'incendio nominale, ovvero quello comune, inteso come la curva ISO834;

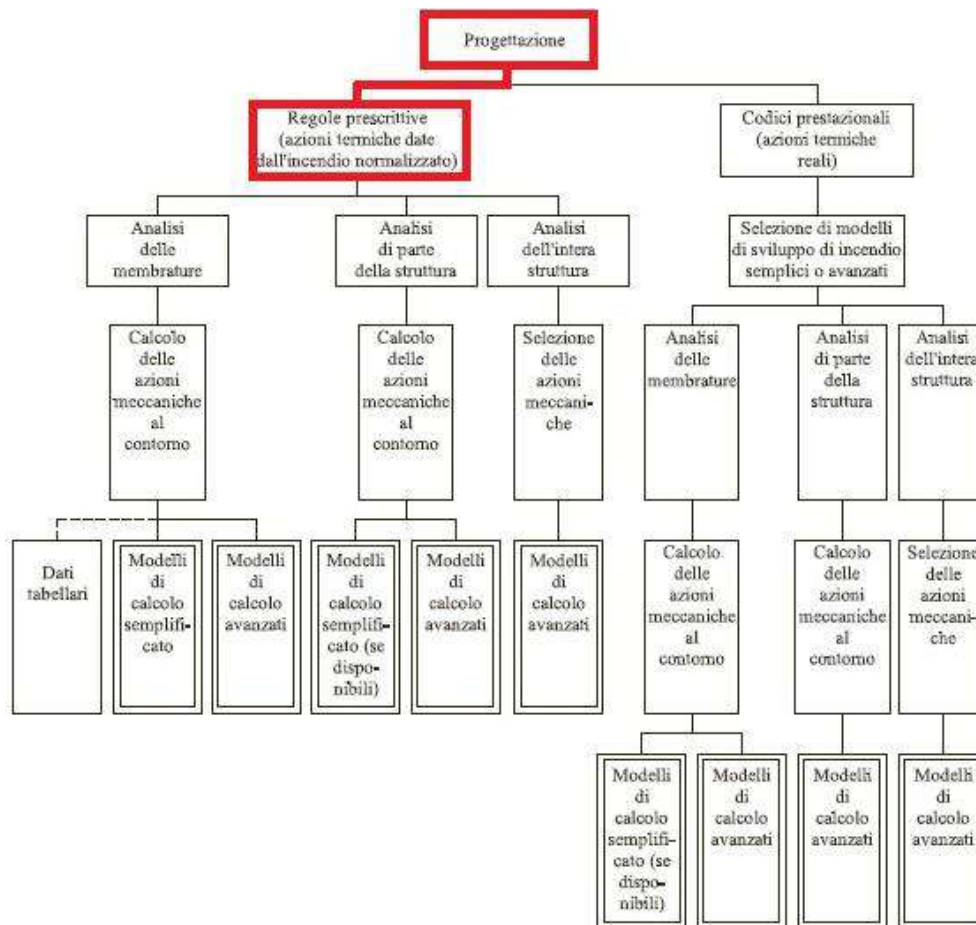


Figure 2-1 Procedura di progettazione

- Modelli avanzati come quelli a una o due zone oppure a campi (CFD), i quali vengono utilizzati per evidenziare la reazione non uniforme degli incendi localizzati nel lasso di tempo desiderato.

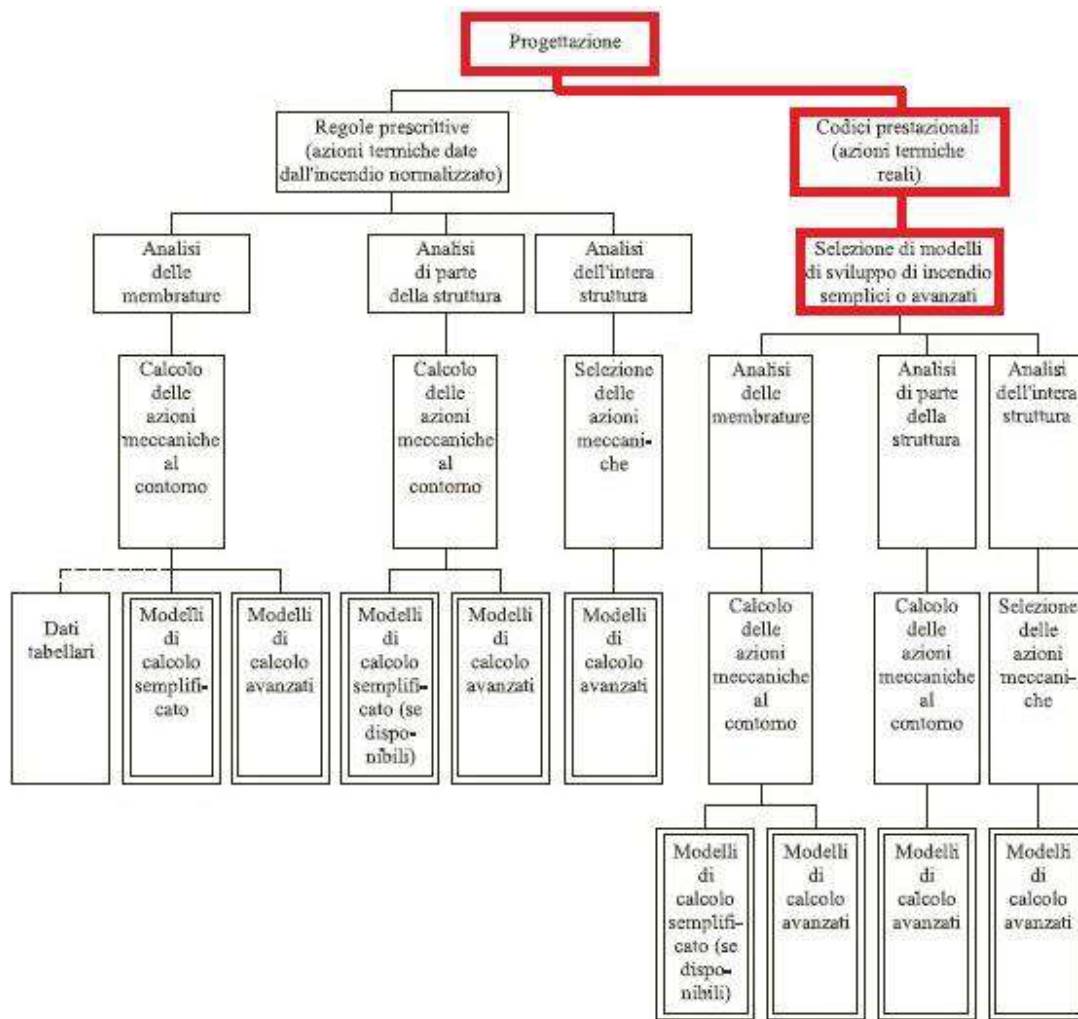


Figure 2-2 Procedura di progettazione

3 CURVE NOMINALI O STANDARD

Grazie alla loro semplice lettura e alla loro proprietà di riuscire ad illustrare le condizioni più estreme d'incendio, il progettista fa un largo uso delle curve standard d'incendio, basate su di un sempre plausibile raggiungimento del *flashover* nella struttura in esame, anche non tenendo in conto dei materiali al suo interno o dei varchi di ventilazione.

L'ECI 1991-1-2 stabilisce tre curve nominali:

- La *nominale standard*, alla base delle metodologie tabellari di resistenza al fuoco delle strutture:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1)$$

In cui:

- t è il tempo in minuti;
- θ_g è la temperatura media dei gas di combustione misurata in centigradi.

La mancanza di un ramo decrescente, ad indicare un calo delle temperature, è da considerare come un'insufficienza di tale curva, dal momento che si tratta di un evento di grande rilievo, soprattutto se presente un apprezzabile vincolo termico.

- La curva d'incendio da idrocarburi, utile nel momento in cui un elemento strutturale è infiammato a causa della combustione di un liquido. È esprimibile come:

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

Dove:

- t è il tempo in minuti
- θ_g è la temperatura, misurata in gradi centigradi, che si trovano nella struttura.
- La curva d'incendio esterno, adatta al fine di progettare elementi strutturali posti al di fuori dell'edificio vittima dell'incendio, congetturando che questi elementi si trovino a temperature inferiori in confronto a quelle registrate all'interno della struttura. Si definisce per mezzo della seguente relazione:

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

- T è il tempo calcolato in minuti;
- θ_g è la temperatura espressa in centigradi.

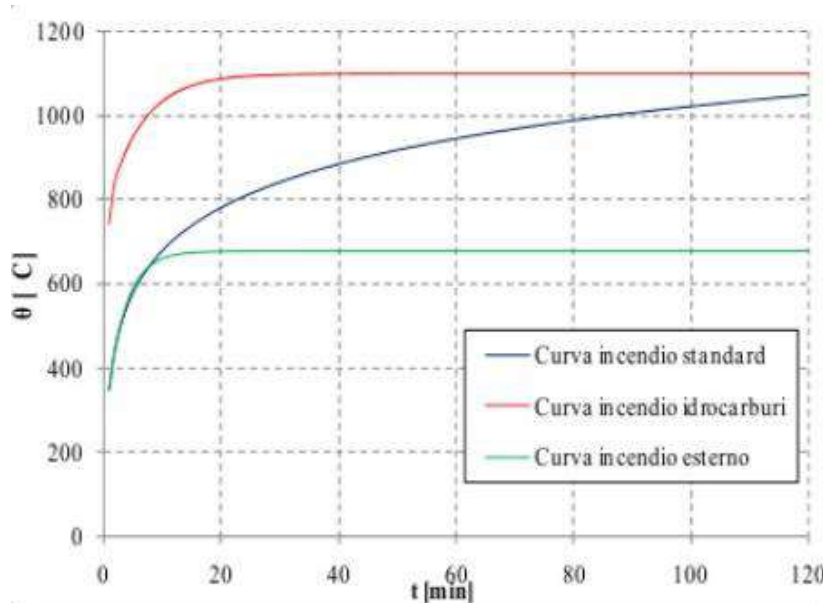


Figure 3-1 Curve d'incendio

4 CARICO DI INCENDIO

La completa energia adoperabile, rilasciata nel mezzo di un incendio, è detta *carico d'incendio*. Si può valutare deterministicamente con la somma degli apporti dei vari materiali infiammabili presenti, i quali sono in grado di pronosticare un ragionevole valore di riferimento.

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum (\psi_i m_i H_{ui} M_i)$$

Ove:

- M_i si riferisce alla massa, espressa in chilogrammi, del materiale i-esimo;
- m_i è il coefficiente considerante eventuali protezioni del materiale i-esimo nel corso della combustione;
- H_{ui} è il potere calorifico, espresso in MJ/kg, del potere calorifico netto;
- A_f è la superficie in pianta, espressa in metri quadri, racchiusa nel perimetro interno delle pareti che delimitano il compartimento;
- Ψ_i è il coefficiente che considera probabili protezioni del carico d'incendio del materiale i-esimo, diminuendone l'intervento nella combustione.

Con $H_{ui}M_i$ è indicata l'energia totale presente nel materiale i-esimo, la quale è liberata nel caso in cui si verifichi una combustione integrale. Il coefficiente adimensionale m_i è compreso fra i valori 0 e 1 ed esprime il vigore della combustione: se m_i equivale ad 1, allora la combustione sarà portata a termine, mentre se m_i è uguale a 0, allora si tratta di un materiale che non contribuisce ad alimentare l'incendio. Per quanto concerne i materiali formati da cellulosa, si consiglia un valore di m_i pari a 0,8, mentre per il potere calorifico del legno si rammenta 17.5 MJ/kg e, di conseguenza, un valore di mH_u equivalente a 14MJ/kg.

Un simile approccio di tipo statistico è considerato idoneo esclusivamente per gli edifici in cui il carico d'incendio risulta dipendente dall'utilizzazione, risultando, così, rassomigliante nei vari compartimenti in cui avviene il medesimo fenomeno. Si può provvedere, dunque, a fornire la densità d'incendio sotto forma di distribuzione statistica, individuata dalla deviazione standard e dal valor medio. Nel determinare un carico d'incendio specifico in modo statistico, l'Eurocodice sancisce un rimando a valori aventi una probabilità di superamento, nel mezzo della vita utile della struttura, che sia minore del 20%, ovvero un frattile dell'80% della distribuzione statica del carico.

Per considerare le reali condizioni di svolgimento dell'incendio e delle probabili misure di protezione attiva, il carico d'incendio caratteristico diviene:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n q_f$$

Ove:

- q_f indica il carico d'incendio caratteristico,
- q_{fd} si riferisce al carico d'incendio di progetto;
- δ_{q1} è il fattore considerante il rischio d'incendio sulla base della grandezza del compartimento;
- δ_{q2} è il fattore che indica il rischio d'incendio tenendo conto dell'attività eseguita all'interno del compartimento.
- $\delta_n = \prod \delta_{ni}$ considera i diversi provvedimenti di protezione attiva.

Con la metodologia FORM e per mezzo della distribuzione statistica del carico d'incendio in base alle diverse mansioni, si è giunti a valutare i coefficienti parziali δ da utilizzare per ottenere il carico d'incendio di progetto sulla base :

- Di misure di protezione attiva, quali sistemi di rilevazioni, sprinkler e altri ancora
- Dell'obiettivo di probabilità prefissato
- Dell'intervento dei Vigili del fuoco o di squadre d'emergenza
- Delle mansioni svolte nell'edificio;
- Della compartimentazione, dunque dei sistemi di protezione passiva.

Le attuali regolamentazioni assumono i seguenti valori dei parametri δ_i :

Misura antincendio minima		δ_{ni}	
Controllo dell'incendio (Capitolo S.6) con livello di prestazione III	rete idranti con protezione interna	δ_{ni1}	0,90
	rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{ni2}	0,80
Controllo dell'incendio (Capitolo S.6) con livello minimo di prestazione IV	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna	δ_{ni3}	0,54
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna	δ_{ni4}	0,72
	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{ni5}	0,48
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{ni6}	0,64
Gestione della sicurezza antincendio (Capitolo S.5), con livello minimo di prestazione II [1]		δ_{ni7}	0,90
Controllo di fumi e calore (Capitolo S.8), con livello di prestazione III		δ_{ni8}	0,90
Rivelazione ed allarme (Capitolo S.7), con livello minimo di prestazione III		δ_{ni9}	0,85
Operatività antincendio (Capitolo S.9), con soluzione conforme per il livello di prestazione IV		δ_{ni10}	0,81

[1] Gli addetti antincendio devono garantire la presenza continuativa durante le 24 ore.

Tabella 4-1 Misura antincendio minima

5 CURVE PARAMETRICHE

Per ciò che concerne gli incendi parametrici, l'EC 1991-1-2 provvede ad un'equazione utilizzabile per ottenere una relazione temperatura-tempo per una generica concomitanza di fattore di ventilazione, di materiale per rivestire le pareti e di carico d'incendio. Le curve dell'incendio parametrico presenti all'interno dell'Eurocodice forniscono i mezzi per analizzare il periodo di combustione stabilizzata. Si può usufruire di tali curve, le quali risultano un'efficiente metodologia di calcolo semplificato, nelle seguenti situazioni:

- Soffitto e pareti dell'edificio realizzate con un unico strato di materiale;
- Assenza di aperture nella copertura;
- Temperatura omogenea nella struttura;
- Presenza di compartimenti con un'estensione fino a 500 m² in pianta;
- Carico d'incendio della struttura incendiato completamente fino allo spegnimento;
- Un'altezza del compartimento di massimo 4 m.

Nel momento in cui si è nei casi elencati sopra, la relazione fra temperatura e tempo sarà definita da:

$$\theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$$

In cui:

- $t^* = t \cdot \Gamma$ è un tempo fittizio [h]
- θ_g si riferisce alla temperatura, in gradi centigradi, dei gas all'interno del compartimento.

Con:

- t tempo [h];
- $\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2$;
- $b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ con i limiti $100 \leq b \leq 2200$ [J/m² s^{1/2}K];
- ρ è la massa volumica della superficie esterna del compartimento [kg/m³];
- c è il calore specifico della superficie del compartimento [J/kg K];
- λ è la conducibilità termica del compartimento [J/kg K];
- $L = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$ è il fattore di apertura con i limiti $0,02 \leq L \leq 0,20$ [m^{1/2}];
- A_v è l'area totale delle aperture verticali sulle pareti [m²];
- h_{eq} media pesata delle altezze delle finestre [m];
- A_t area totale del compartimento [m²].

La curva d'incendio parametrico si fonda sulla premessa che soffitto e pareti della struttura siano realizzati con un unico strato di materiale.

Nel momento in cui risultano esserci più strati di materiali differenti, l'Eurocodice offre una formula per calcolare il valore efficace b .

La θ_{max} durante la somministrazione del calore avviene al tempo:

$$t^* = t_{max}^*$$

In cui:

- $t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma$ [h];
- con $t_{max} = \max \left[\left(0,2 \cdot \frac{10^{-3} q_{t,d}}{0} \right); t_{lim} \right]$ [h];

ove:

- $q_{t,d}$ indica il valore di progetto del carico di incendio specifico relativo all'area totale A^t del compartimento di modo che $q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t}$ [MJ/m²],

con il rispetto dei seguenti limiti:

- $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ [MJ/m²].
- $q_{t,d}$ si riferisce al valore di progetto del carico d'incendio specifico relativo all'area in pianta del pavimento [MJ/m²].
- t_{lim} dipende dalla velocità di crescita dell'incendio, che a sua volta può essere:
 - Bassa, $t_{lim} = 25$ minuti;
 - Media, $t_{lim} = 20$ minuti;
 - Rapida, $t_{lim} = 15$ minuti.

Nel momento in cui $t_{max} = t_{lim}$ rimpiazza il valore t^* con:

$$t^* = t \Gamma_{lim}$$

Poiché:

$$\Gamma_{lim} = (O_{lim}/b)^2 / (0,04/1160)^2 ;$$

$$O_{lim} = \frac{0,1 * 10^{-3} q_{t,d}}{t_{lim}}$$

Si verifica:

$$O > 0,04 \text{ e } q_{t,d} < 75 \text{ e } b > 1160$$

Γ_{lim} deve essere moltiplicato per il fattore k dato dalla formula seguente:

$$k = 1 + \left(\frac{0 - 0.04}{0.04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1160 - b}{1160} \right)$$

$$\Gamma_{lim} = \frac{\left(\frac{0_{lim}}{b} \right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160} \right)^2} k$$

Per quanto riguarda le curve durante il raffreddamento sono definite dalle relazioni seguenti:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^* x) \quad \text{se } t_{max}^* \leq 0.5h$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^* x) \quad \text{se } 0.5h < t_{max}^* \leq 2h$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* x) \quad \text{se } t_{max}^* \geq 2h$$

Dove:

$$t_{max}^* = \left[\frac{0.2 * 10^{-3} q_{t,d} \Gamma}{0} \right]$$

$$x = \begin{cases} 1.0 & \text{se } t_{max} > t_{lim} \\ \frac{t_{lim} \Gamma}{t_{max}^*} & \text{se } t_{max} = t_{lim} \end{cases}$$

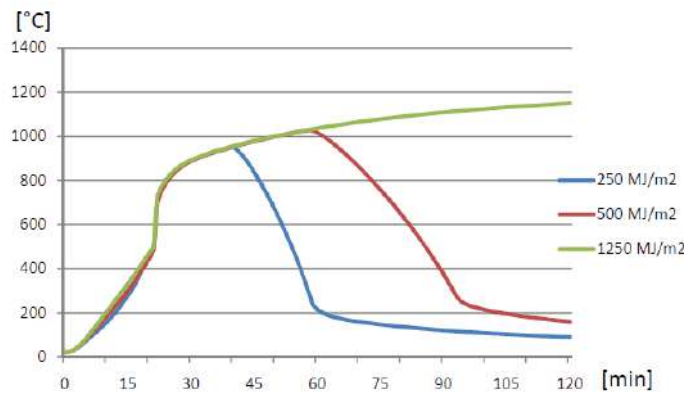


Figura 5-1 Andamento temperature

Il grafico sopra riportato mostra l'evoluzione delle temperature in relazione al tempo e al modificarsi del carico d'incendio in m^2 . Superato l'aumento della temperatura che si verifica all'inizio, è possibile notare un ramo discendente, conseguenza dell'incendio del 70% del materiale all'interno della struttura. Si sottolinea, soprattutto, l'importanza

del fattore di crescita, che permette di mantenere nella stessa maniera le temperature dei casi esaminati fino al principio del ramo decrescente.

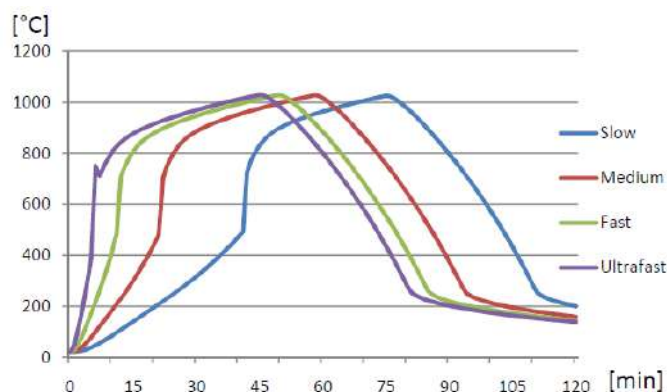


Figura 5-2 Andamento temperature

Nel seguente grafico, invece, è possibile studiare le curve parametriche ottenute con un uguale carico d'incendio al variare della velocità d' incremento della combustione. Le temperature, mosse sull'asse del tempo di un coefficiente, il quale dipende dal fattore di accrescimento dell'incendio, arrivano al medesimo livello.

Il fattore di accrescimento inficia al principio, per poi passare in secondo piano, dal momento che le curve conservano l'una con l'altra una distanza equivalente a quella raggiunta precedentemente.

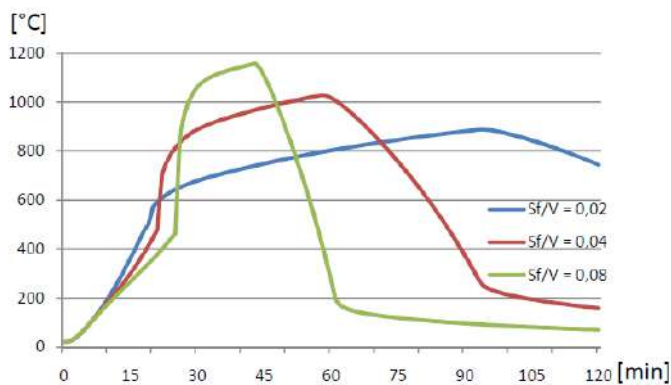


Figura 5-3 Andamento temperature

Nel grafico proposto, si evidenzia l'influenza fra il volume e le superfici aperte: si può subito osservare come il fattore di ventilazione riesca a determinare un lento aumento delle temperature rispetto alla fase iniziale.

Infatti, se l'incendio è sotto il controllo della combustione del materiale, entra aria fresca che rallenta l'incremento delle temperature. Al contrario, se l'incendio dipende dalla ventilazione, le temperature aumentano di gran lunga in confronto alle altre curve dove questa è maggiore.

6 INCENDI LOCALIZZATI

Le curve precedentemente analizzate implicano uno sviluppo esauriente dell'incendio, permettendo, in questo modo, uguali situazioni di temperatura in tutto l'edificio. Spesse volte, comunque, soprattutto in spazi ampi in cui è presente poco combustibile o nel caso di un incendio limitato dall'azione degli sprinkler, si origina un incendio localizzato, diverso da quello completo.

Il pre-flashover è influenzato dal quantitativo di combustibile in grado di alimentare la sorgente. Per quanto riguarda la produzione di gas e fumi, si crea una sovrapposizione verso l'alto dei vari prodotti, i quali fluttuano sulla più fresca aria che si trova al di sotto. Quando i prodotti della combustione, adesi sulle pareti e sul soffitto, sono abbastanza lontani dalla sorgente principale, allora iniziano ad abbassare le proprie temperature, provocando una ricombinazione con l'aria sottostante.

Per mezzo di alcune espressioni di cui è dotato l'Eurocodice, è possibile calcolare l'azione termica appartenente ad un incendio localizzato.

L'RHR, ovvero la percentuale di rilascio dell'energia, caratterizza fortemente la sorgente dell'incendio. Tale parametro è in grado di fornire l'evoluzione della potenza termica nella combustione, tenendo conto anche del tempo.

Alle volte, occorre prendere in considerazione alcune differenze basandosi sull'altezza della fiamma in relazione al soffitto.

Se si analizzano incendi che non lambiscono le superfici del soffitto, l'Eurocodice assegna delle formule semplificate, dalle quali si è in grado di calcolare la temperatura sull'asse verticale della fiamma. Tutt'altro discorso per gli incendi le cui fiamme arrivano a toccare il soffitto: per questi casi vi sono delle metodologie che permettono di calcolare il flusso termico subito dalla superficie del soffitto esposta alle fiamme. Le formule fornite si possono utilizzare per fiamme con diametro al massimo di 10m e con una velocità di rilascio termico di massimo 50W.

L'evoluzione della fiamma L_f in un incendio localizzato si ricava in tal modo:

$$L_f = -1.02D + 0.0148Q^{2/5}$$

Nel momento in cui alcuna fiamma lambisce il soffitto e l' L_f è minore dell' H della struttura, oppure considerando una combustione all'aria libera, la seguente relazione permette il calcolo della temperatura, indicata con $\Theta(z)$, nel pennacchio sull'asse di simmetria verticale:

$$\theta(z) = 20 + 0.25Q_c^{\frac{2}{3}}(z - z_0)^{-\frac{5}{3}} \leq 900 \quad [^{\circ}C]$$

In cui:

- Q_c è la parte convettiva del rilascio di calore dell'incendio, data da $Q_c=0.8Q[W]$
- z è l'altezza lungo l'asse verticale della fiamma [m]
- z_0 è l'origine virtuale dell'asse della fiamma [m]

Quest'ultimo si definisce con:

$$z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{\frac{2}{5}}$$

z_0 può avere un valore negativo e in quel caso si localizza sotto la sorgente dell'incendio: ciò mostra un'area della sorgente più estesa rispetto all'energia rilasciata sull'area stessa.

Se il materiale infiammabile rilascia grandi quantitativi di energia su di un'area non molto estesa, z_0 assumerà valore positivo e avrà localizzazione sulla sorgente.

Se si tratta di un carico d'incendio sufficientemente elevato, allora L_f risulterà maggiore di H e si avrà, implicando un andamento orizzontale, una fiamma adesa al soffitto. Il metodo Hasemi è in grado di definire le proprietà di un simile incendio, oltre che la temperatura alla quale si trovano le superfici degli elementi esposti.

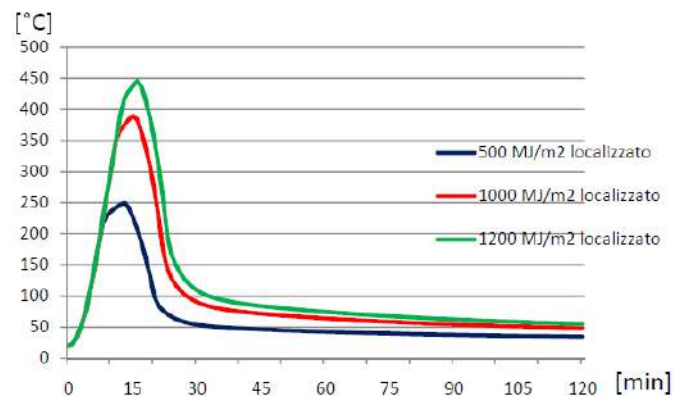


Figura 6-1 Andamento temperature

Dal grafico riportato sopra, assumendo che il fuoco si estende ad una sola superficie di 5 m^2 , al mutare del carico d'incendio è possibile notare un'evoluzione costante delle curve, avente un iniziale picco, seguito da un rapido raffreddamento, conseguenza dello spegnimento dell'incendio, dato dal termine del combustibile o dall'azione degli impianti atti a spegnere l'incendio divampato.

I modelli a zone, null'altro che prototipi numerici, permettono di localizzare, all'interno del compartimento in cui ha luogo l'incendio, delle zone distaccate, ove densità, energia interna, pressione e temperatura risultano concordi.

Per il post-flashover è utilizzato il modello base, quello ad una sola zona, dove tutti i termini di raffronto sono regolari.

Da tale modello derivano, inoltre, quelli più complessi a più zone.

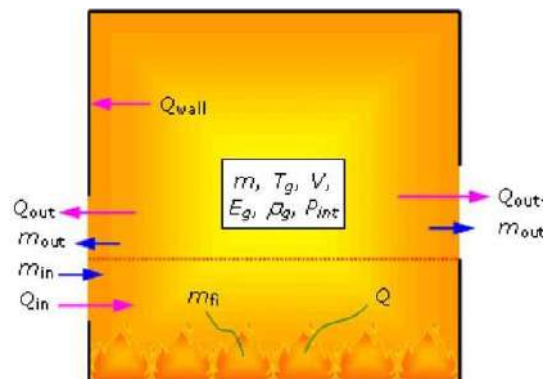


Figura 6-2 Modello una zona

Il principio di conservazione della massa e dell'energia nelle diverse zone risulta fondamentale per i modelli multi zona.

Considerando il modello a due zone, si può osservare come assuma che i prodotti si addensino in una singola stratificazione, avente interfaccia piana e orizzontale, situata inferiormente rispetto al soffitto. Si può, dunque, suddividere il compartimento in: uno strato superiore, uno inferiore, le parete, il gas esterno, il fuoco e il pennacchio.

I due strati, seppur attigui, non sono in grado di scambiare direttamente energia oppure massa fra di loro: ciò avviene per mezzo del pennacchio, una vera e propria pompa di energia e massa.

Anche tale modello, come il precedente, è fondato sugli stessi principi di conservazione.

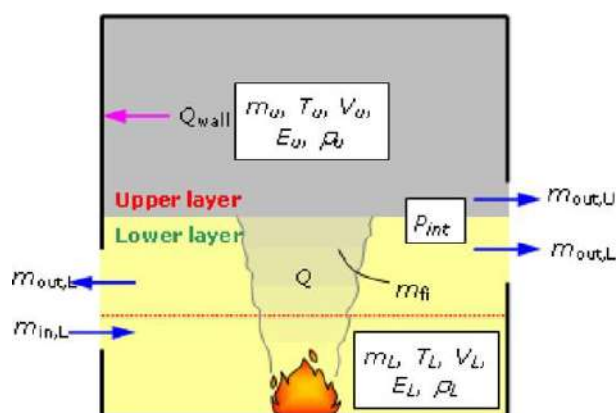


Figura 6-3 Modello due zone

I modelli di fluidodinamica computazionale sono, invece, i più all'avanguardia. Quelli di campo permettono di stimare il processo incendiario in un dato spazio, permettendo una risoluzione numerica delle equazioni fondamentali della corrente dei fluidi originata da un incendio.

Le metodologie agli elementi finiti o a quelli di confine, oppure alle differenze finite, permettono l'esplicazione dello studio per mezzo dei modelli di campo: tali modelli permettono, così, la suddivisione tridimensionale del compartimento, risolvendo le equazioni di conservazione al loro interno. Più è grande il quantitativo di elementi di questa griglia tridimensionale, più esauriente sarà la soluzione. Sono, dunque, in grado di plasmare incendi localizzati o in pre-flashover, ma anche lo spostamento dei fluidi e gli incendi che si trovano in uno stato posteriore al flashover stesso.

7 CONFRONTO TRA I CASI ANALIZZATI

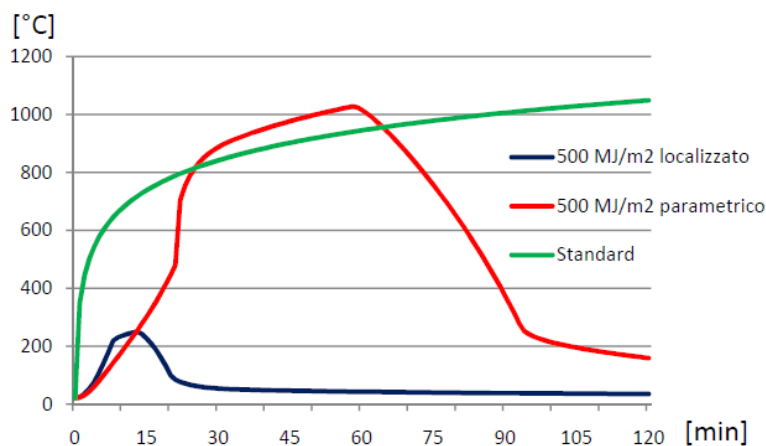


Figura 7-1 Andamento temperature

Attraverso tale grafico, che illustra l'evoluzione delle tre curve temperature-tempo, si è in grado di arrivare alle seguenti conclusioni.

La curva nominale standard, ad esempio, ipotizza che l'incendio vada avanti all'infinito, non evidenziando nessun tipo di raffreddamento. Inoltre, dimostra una rapidissima crescita iniziale, con temperature molto superiori rispetto a quelle delle altre curve, seguita da un asintoto orizzontale.

Le curve parametriche hanno, inizialmente, una pendenza piuttosto bassa, per poi giungere a temperature superiori a quelle della nominale standard, con la quale

evidenzia affinità durante la totale evoluzione dell'incendio, per poi evidenziare un raffreddamento.

Le curve d'incendio localizzato possiedono un importante apice iniziale, superiore a quello delle parametriche con uguale carico d'incendio. Subito dopo, conseguentemente allo spegnimento dell'incendio, fanno notare un repentino abbassamento delle temperature. È bene evidenziare che un aumento del carico d'incendio provoca un incremento delle temperature iniziali, superando quelle della standard. Infine, il computo delle temperature degli elementi realizzati in acciaio deve tener conto dell'irraggiamento della fiamma.

8 VELOCITÀ DI RILASCIO Q

Al fine di poter utilizzare i modelli più sofisticati, occorre definire il modo con cui avviene il rilascio del calore nel mezzo dell'incendio, oltre che determinare i processi che portano ad un rilascio di energia, così da avere una descrizione dello sviluppo dell'incendio il più realistica possibile. Quest'ultimi sono legate alla potenza liberata dall'incendio durante l'esplicitarsi del fenomeno.

Il variare, nello spazio e nel tempo del rilascio dell'energia da parte del combustibile, regola il rapporto fra il materiale combustibile e l'ambiente, gli scambi del sistema termodinamico e le temperature dei gas prodotti. Proprio per questo, un uguale carico d'incendio può bruciare a diverse velocità, in base alle diverse condizioni esistenti fra l'ambiente e il materiale, originando diversi volumi di controllo o temperature nell'ambiente coinvolto.

L'evoluzione del rilascio energetico è descritta dalla percentuale di rilascio del Rate of Heat Released (RHR) o dell'Heat Release Rate (HRR), che illustra la potenza termica liberata nello spazio durante l'incendio al variare del tempo.

Mentre l'RHR analizza la liberazione di una data potenza termica, cioè un parametro basato sulla realtà, il carico d'incendio si riferisce ad un'energia liberata senza alcuna relazione col tempo trascorso.

L'RHR rimane più attendibile, anche, per quanto riguarda la temperatura raggiunta all'interno di un compartimento chiuso durante il pre-flashover: in questo stadio, il carico d'incendio riporta dei valori conservativi delle temperature, implicando, nelle valutazioni postume al flashover, una partecipazione completa di tutto il combustibile presente nello spazio.

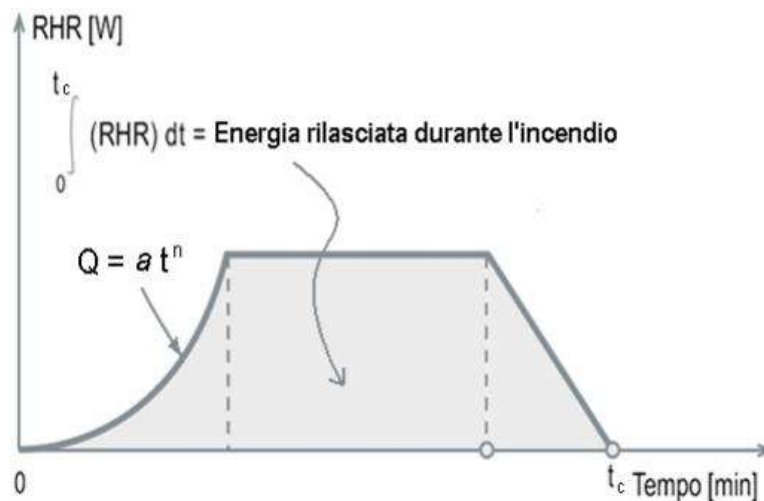


Figura 8-1 Curva RHR

Nell'Eurocodice EN1991-1-2, si fa riferimento al miglior modello per la rappresentazione dei normali combustibili presenti nelle costruzioni.

I suoi punti fondamentali sono:

- Stadio di propagazione con crescita quadratica;
- Stadio di completo sviluppo con plateau orizzontale;
- Stadio di estinzione con degradazione lineare.

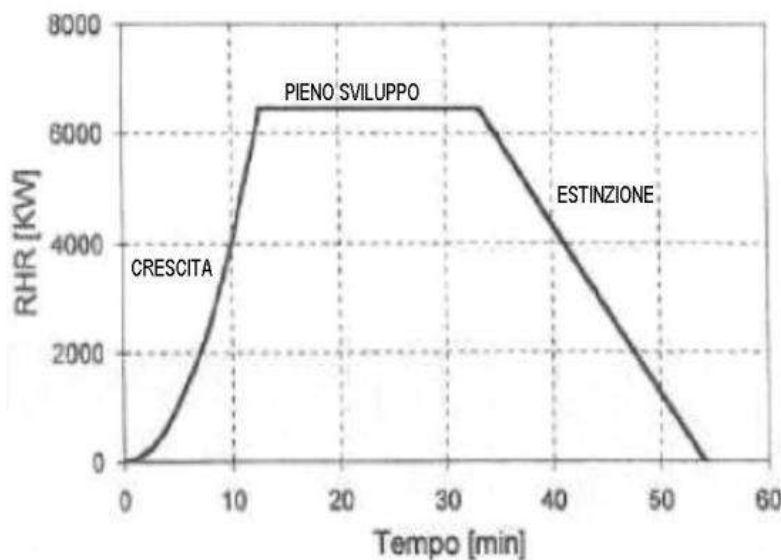


Figura 8-2 Curva RHR

Nell'ignizione, la potenza termica totale liberata nello spazio circostante aumenta parabolicamente fino a giungere al punto di flashover. Superato quest'ultimo, la potenza termica liberata risulta continua fino alla fine della combustione, giungendo poi ad un esaurimento progressivo al termine del materiale combustibile.

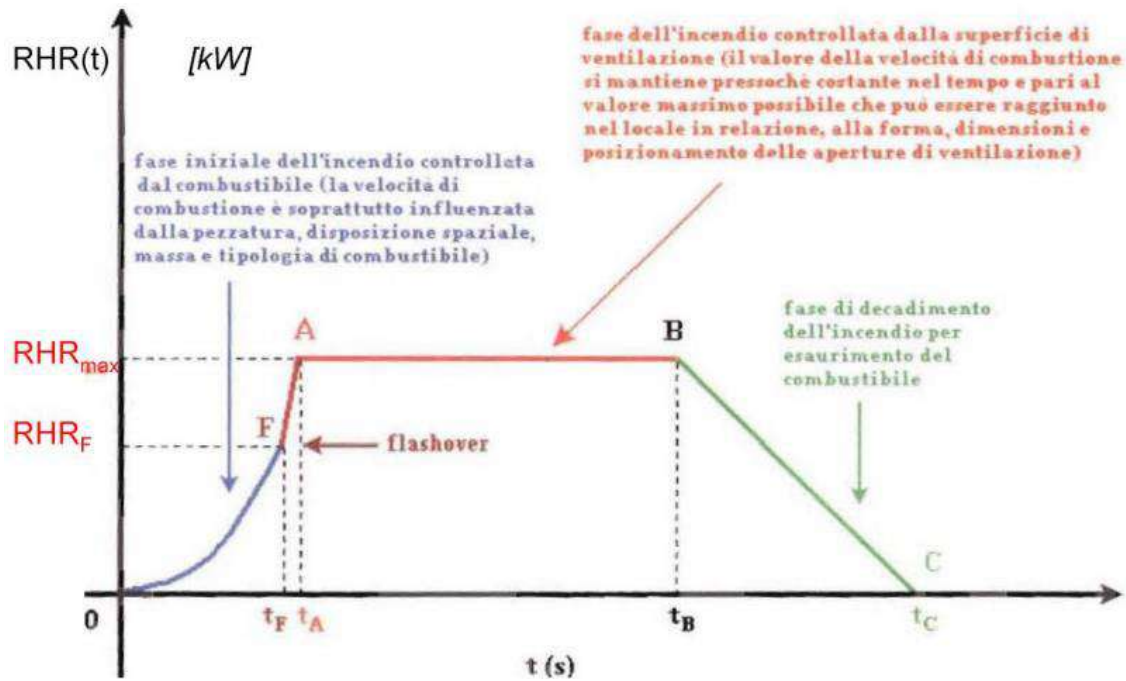


Figura 8-3 Curva RHR

$$RHR(t) = \sum_{i=1}^n V_{c,i}(t)H_i$$

Dove:

- $V_{c,i}$ indica la rapidità con cui si verifica la combustione dell'i-esimo materiale combustibile (kg/s);
- H_i è il minor potere calorifico dell'i-esimo combustibile (kJ/kg).

L'RHR, come dimostrato da numerosi esperimenti, cambia in maniera quadratica rispetto a t . Al fine di permettere delle analisi analitiche, sono state create 4 curve di evoluzione dell'incendio, ciascuna con un proprio tempo t_g , equivalente al tempo con cui si giunge a sviluppare una potenza di 1.000kW.

Lo svolgimento in funzione del tempo dello RHR fino al flashover è quadratico: per tale motivo, fino al tempo t_f , equivalente al tratto di crescita, si utilizza l'espressione presente nelle regolamentazioni NFPA 92 B e NFPA 72.

$$RHR(t) = V_c(t)H = \alpha t^2$$

Tipo di incendio atteso	Tempo di sviluppo della potenza di 1.000 kW t_d (s)	$\dot{q} = \frac{1.000}{t_d^2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{s}^2} \right)$
ULTRAFAST	75	0,1777
FAST	150	0,0444
MEDIUM	300	0,0111
SLOW	600	0,0277

Tabella 8-1 Tempo di sviluppo della potenza

Attività	Sviluppo atteso dell'incendio	Potenza termica massima specifica rilasciata (kW/m ²)	t_d (s)	α (kW/s ²)
Uffici	MEDIUM	200-250	300	0,0111
Centri commerciali	FAST	500	150	0,0444
Camere di ospedale	MEDIUM	250	300	0,0111
Camere di albergo	MEDIUM	250	300	0,0111
Biblioteche	FAST	500	150	0,0444
Appartamenti	MEDIUM	250	300	0,0111
Aule scolastiche	MEDIUM	250	300	0,0111
Cinema e teatri	FAST	500	150	0,0444

Tabella 8-2 Potenza termica massima specifica rilasciata

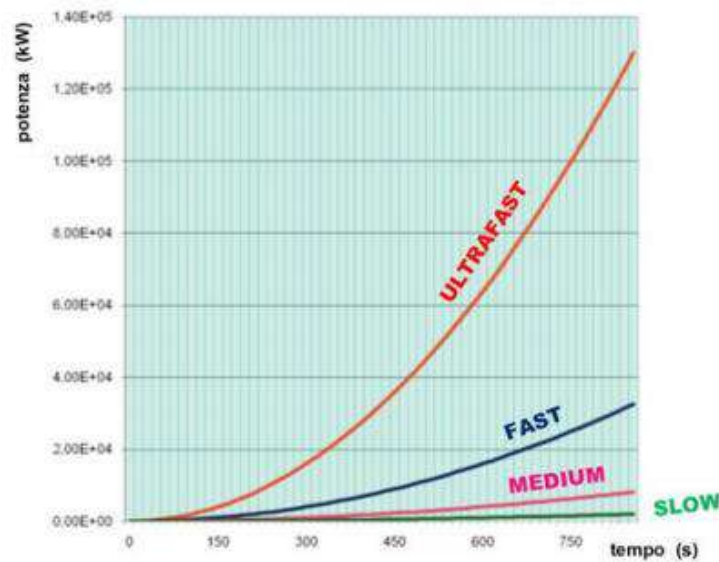


Figura 8-4 Potenza

Con questi dati di input è possibile determinare:

1. La massima potenza termica rilasciata dal compartimento;
2. Il tipo di sviluppo atteso [ultrafast (75 s), fast (150 s), medium (300 s), slow (600 s)];
3. Il tempo di raggiungimento del flashover;
4. La durata dell'incendio.

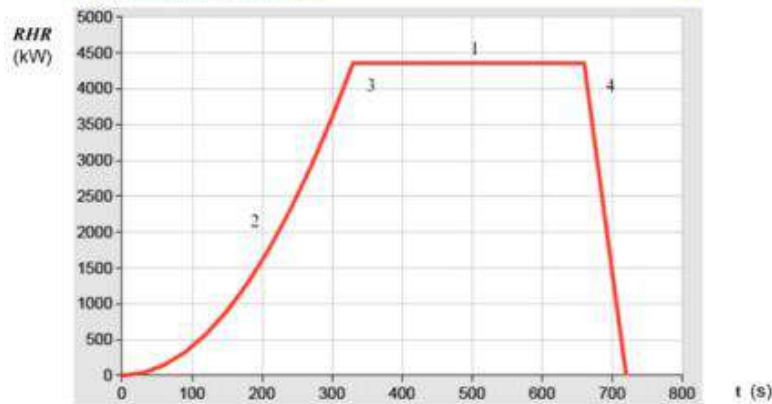


Figura 8-5 Curva RHR

Attraverso un'espressione riportata dall'Eurocodice 1, nell'allegato E, per quanto riguarda gli incendi ordinati dalla superficie di ventilazione, si registra un valore massimo RHR_{max} pari a:

$$RHR_{max} = 0.10mHA_v h_{eq}^{0.5}$$

In cui:

- m è il fattore di partecipazione alla combustione
- H è il potere calorifico del materiale combustibile
- A_v è la superficie complessiva delle aperture di aerazione del locale
- h_{eq} è l'altezza equivalente.

Grazie ad una spiegazione dinamica dell'incendio e al fatto di poter essere uno fra i dati di entrata e di uscita per i modelli multi zona, l'RHR possiede un'importanza indiscussa. Se si prende in considerazione un incendio il cui flashover ha luogo in un compartimento chiuso, lo stadio iniziale di RHR esprime i requisiti necessari del pre-flashover, del flashover e del post-flashover, mentre lo stadio intermedio di RHR definisce gli attributi del post-flashover nel compartimento.

9 TRASMISSIONE DEL CALORE

Conoscere ben affondo gli eventi e le leggi su cui si fonda il passaggio del calore, regolato dalla convezione, dalla conduzione e dall'irraggiamento, che possono

avvenire in fasi diverse o contemporaneamente, è fondamentale per una corretta comprensione dell'incendio.

1. Conduzione

Uno dei processi caratteristici dei solidi è la conduzione: quando i materiali presentano un'affidabile conducibilità termica, avviene una trasmissione del calore per mezzo dell'influenza reciproca degli elettroni liberi, motivo per cui i materiali conduttori di elettricità sono anche eccellenti conduttori di calore. Al contrario, i cattivi conduttori hanno una bassa conducibilità termica e propagano il calore attraverso delle opportune vibrazioni molecolari.

Tale variabile è fondamentale per la combustione delle superfici solide e per la resistenza nei confronti del fuoco da parte di elementi strutturali e di pareti tagliafuoco.

Inoltre, un'opportuna conoscenza del calore specifico, della conducibilità termica e della densità del materiale permette il computo della trasmissione del calore:

- La densità indica il rapporto fra massa ed unità di volume ed è misurata in kg/m^3 ;
- Il calore specifico, espresso in J/kgK ed indicato con c_p , si riferisce al quantitativo di calore utile per aumentare di un grado centigrado un'unità della massa del materiale in considerazione;
- La conducibilità termica, calcolata in W/mk ed indicata con k , è il quantitativo di calore che attraversa, in un lasso di tempo unitario, un elemento avente una sezione anch'essa unitaria, la quale presenta un gradiente termico di valenza uno fra le sezioni estreme ($\Delta T/\Delta L = 1$);

Bisogna, oltretutto, tener a mente due caratteristiche derivate:

- la diffusività termica, espressa in m^2/s e derivata da $\alpha = k/\rho c_p$;
- l'inerzia termica, indicata con $k\rho c_p$ ed espressa in $\text{W}^2\text{s}/\text{m}^4\text{K}^2$.

Nel momento in cui si procede ad aumentare la temperatura di un qualsiasi elemento con una bassa inerzia termica, allora essa aumenta bruscamente, tanto da essere una proprietà tipica dei materiali con una veloce accensione. Così, i compartimenti rivestiti da simili materiali mostrano delle temperature maggiori rispetto a quelli protetti da materiali di tipologia comune.

All'interno di un regime di tipo stazionario, il flusso del calore per un'area unitaria, espresso in W/m^2 , che viene trasmesso attraverso il processo di conduzione è direttamente proporzionale al gradiente termico fra i due punti considerati:

$$\frac{dq''}{dx} = k \frac{dT}{dx}$$

In cui:

- k è la conducibilità termica (W/mk);
- x è la distanza nella direzione del flusso del calore ed è espressa in metri;
- T si riferisce alla temperatura, misurata in gradi kelvin o in gradi centigradi.

In condizioni di tipo stazionario, il materiale non assimila calore e, pertanto, non varia in alcun modo il proprio regime termico, al contrario, quando si verifica una modifica della temperatura in funzione del tempo, si deve considerare anche il calore utile a far variare la temperatura del materiale esaminato.

Se, invece, si verifica una trasmissione per conduzione di tipo monodimensionale del calore, all'interno di un materiale privo di qualsivoglia pozzo o sorgente di calori interni, si utilizza l'equazione di Fourier.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

In cui.

- α corrisponde alla diffusività termica (m²/s);
- t si riferisce al tempo calcolato in secondi.

Inoltre, è utile evidenziare come i materiali con una minore diffusività termica, nel momento in cui le loro superfici sono lambite da temperature crescenti in una fase transitoria termica; siano in grado di immagazzinare maggiormente il calore di quei materiali aventi un'elevata diffusività termica.

Le stesse considerazioni sono attribuibili anche ai vari tipi di solidi, sia quelli bidimensionali che tridimensionali. Le metodiche utili alla risoluzione dell'equazione di Fourier, oltretutto, sono molteplici e, spesso, utilizzano dei metodi analitici, sia numerici che grafici.

2. Convezione

Per mezzo del moto di fluidi, quali liquidi o gas, la convezione è in grado di trasmettere il calore, divenendo, dunque, un fattore fondamentale per la diffusione dell'incendio, capace di attaccare il soffitto o di rompere dalle finestre per shock termico.

Il processo della convezione avviene, normalmente, fra la superficie di un solido e il fluido che lo raffredda o lo riscalda. La velocità con cui questo avviene è in relazione con numerosi termini, in particolare con la differenza di temperatura tra i due materiali e la velocità del fluido in questione lungo la superficie.

Inoltre, si tiene conto di una proporzionalità diretta tra il flusso di calore per superficie unitaria dq''/dt (W/m²) ed il differenziale termico, esattamente come esposto da Newton:

$$\frac{dq''}{dt} = h\Delta T$$

In cui:

- ΔT è la differenza di temperatura, misurata in gradi kelvin o in centigradi, fra la superficie del solido e il fluido;
- h indica il coefficiente laminare, ovvero il coefficiente di trasmissione convettivo del calore ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

A causa di vari motivi, quali le proprietà del fluido e della sua corrente, oppure la grandezza dello strato limite e la geometria, il coefficiente h può facilmente mutare.

Il valore di $25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ è caratteristico degli elementi strutturali lambiti dalle fiamme, ma è possibile rintracciare diversi valori consultando i testi o le normative, come la EC-1, che suggerisce un valore di:

- $9 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ per quanto concerne la superficie degli elementi di separazione, la quale non risulta direttamente esposta all'incendio, includendo gli effetti del trasferimento per irraggiamento di calore;
- $35 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ per gli incendi parametrici;
- $25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ per gli incendi standard, sia esterni che interni;
- $35 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ per gli incendi rappresentati con modelli avanzati;
- $50 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ per gli incendi di idrocarburi;
- $4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ per quanto riguarda l'area direttamente non esposta alla combustione degli elementi di separazione, escludendo gli effetti di trasferimento per irraggiamento del calore.

3. Irraggiamento

Il trasferimento di energia per mezzo di onde elettromagnetico, in grado di viaggiare sia nei mezzi che nel vuoto, prende il nome di irraggiamento. Questo è un processo fondamentale per gli incendi, nonché il principale modo con cui il calore passa dalle fiamme alle superfici dei materiali limitrofi, ma anche da una struttura in fiamma a quella contigua e dal fumo cocente agli oggetti nel compartimento.

La relazione, instaurata fra la temperatura a cui si torva la superficie radiante e il flusso di calore radiante dq''/dt in un qualsiasi zona della superficie ricevente, si esprime come:

$$\frac{dq''}{dt} = \varphi \varepsilon_e \sigma T_e^4$$

In cui:

- T_e è la temperatura assoluta in kelvin della superficie radiante;
- ε_e indica l'emissività della superficie emittente, ovvero di quella radiante;
- φ si riferisce al fattore di configurazione;
- σ indica la costante di Stefan Boltzmann, pari a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Dal momento che entrambe le superfici considerate irradiano ed acquistano energia, il flusso del calore risultante dq''/dt (W/m^2) dalla più cocente superficie emittente a quella ricevente, posta a temperature inferiori, è esprimibile con:

$$\frac{dq''}{dt} = \varphi \varepsilon_e \sigma (T_e^4 - T_r^4)$$

In cui:

- T_r indica la temperatura assoluta, espressa in gradi kelvin, della superficie ricevente;
- ε si riferisce all'emissività risultante delle due superfici, ricavabile come:

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

In cui:

- ε_r si riferisce all'emissività della superficie ricevente.

L'emissività ε è l'efficienza del piano radiante nell'emissione di calore e i suoi valori si aggirano fra 0 e 1, quest'ultimo assegnato ai cosiddetti corpi neri.

Solitamente, durante un incendio, le particelle dei fumi, le fiamme luminose e le aree calde presentano un valore di emissività attestato fra 0,7 e 1.

L'emissività, inoltre, può cambiare il proprio valore nel mezzo di un incendio, come nel caso dell'acciaio zincato, il quale, inizialmente, possiede una bassa emissività, la quale tende ad aumentare quando raggiunge i 40°C , portando lo zinco a fondersi e a scoprire al fuoco il nudo acciaio.

Infine, il fattore di configurazione φ indica quanto l'area ricevente sia in grado di *vedere* quella radiante.

10 PROPRIETÀ TERMICHE DELL'ACCIAIO

Grazie alla EN 1993-1-2, si è in grado di ritrovare precise prescrizioni sulle proprietà termiche degli acciai al carbonio.

Di seguito sono riportate le espressioni per la dilatazione termica presenti all'interno dell'Eurocodice EN1993-1-2:

$$\frac{\Delta L}{L} = 1.2 * 10^{-5} \theta_a + 0.4 * 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 * 10^{-4}$$

per $20^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_a < 750^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta L}{L} = 1.1 * 10^{-2}$$

per $750^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_a < 860^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta L}{L} = 2 * 10^{-5} \theta_a - 6.2 * 10^{-3}$$

per $860^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_a < 1200^{\circ}\text{C}$

dove:

- ΔL indica la variazione di lunghezza indotta dall'incremento di temperatura ϑ_a ;
- ϑ_a si riferisce alla temperatura, espressa in gradi centigradi, nell'acciaio;
- L indica la lunghezza a 20°C .

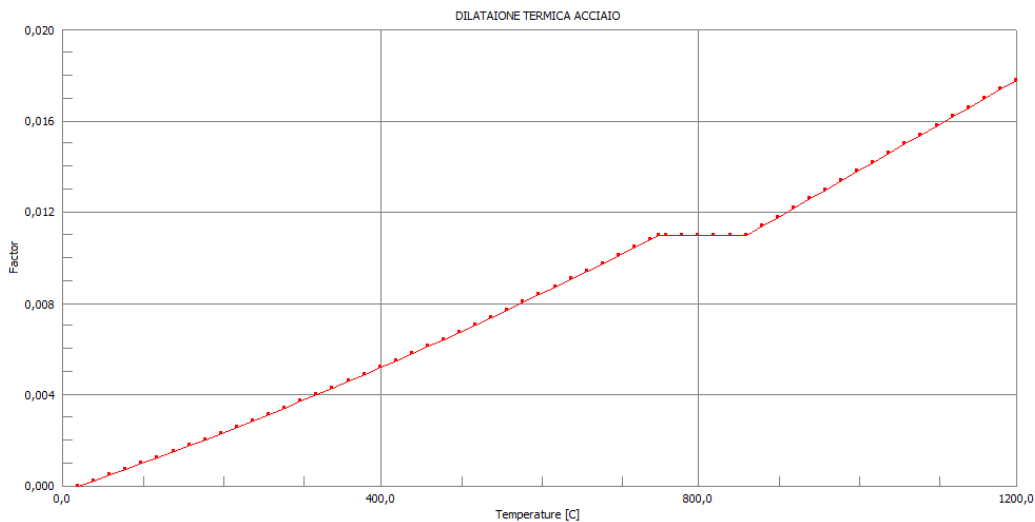


Figura 10-1 Dilatazione termica acciaio

Nel grafico sopra riportato, è evidenziata l'evoluzione del coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio in funzione della temperatura: il plateau, posto fra i 750 e gli 860 °C, considera le conseguenze connesse alla transizione di fase tipica dell'acciaio.

Si può osservare come la dilatazione termica sia non del tutto lontana da un andamento lineare, permettendo di accettare l'espressione:

$$\Delta L/L = 1.5 \cdot 10^{-5} \vartheta_a$$

L'Eurocodice EN 1993-1-2 propone la seguente espressione del calore specifico:

$$c_a = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1.69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$$

per $20^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 600^\circ\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

per $600^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 735^\circ\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

per $735^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 900^\circ\text{C}$

$$c_a = 650$$

per $900^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 1200^\circ\text{C}$

dove:

- ϑ_a si riferisce alla temperatura nell'acciaio in gradi centigradi.

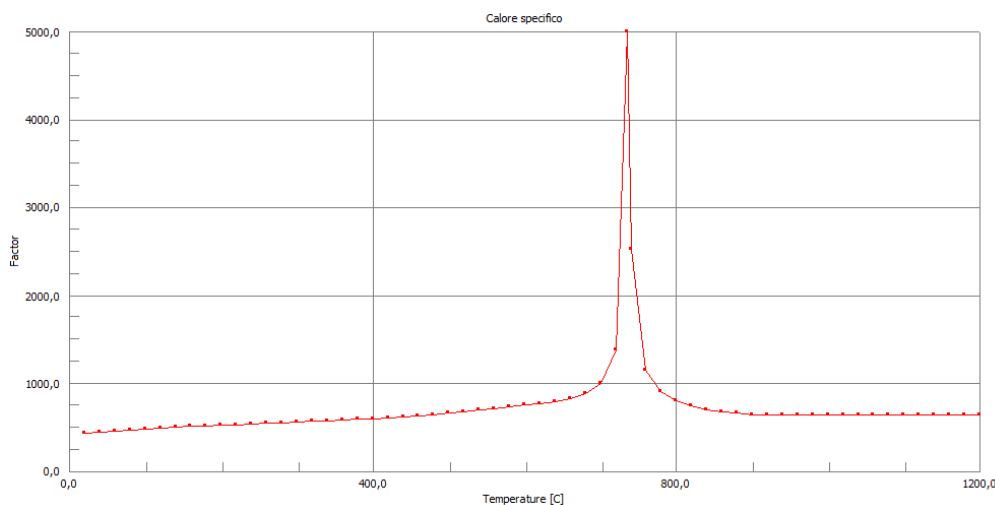


Figura 10-2 Calore specifico

Si può osservare come l'acciaio da carpenteria a 735°C sia soggetto ad una trasformazione allotropica ($Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$), modificando la propria struttura microcristallina, passando da una fase ferrica ad una austenitica. Il materiale, proprio per questo, è in grado di assorbire energia termica non contemplando alcun aumento della temperatura fino alla fine della trasformazione, portando ad un valore infinito del calore specifico.

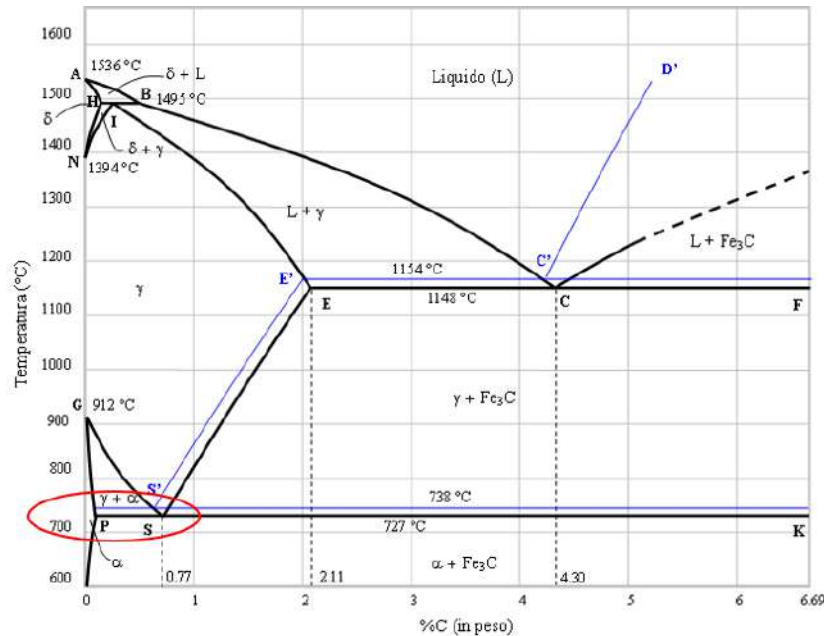


Figura 10-3 Curva ferro-carbone

Di seguito si riporta l'espressione per la conducibilità termica presente nell'Eurocodice EN1993-1-2:

$$\lambda_a = 54 - 3.33 * 10^{-2} \theta_a$$

per $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 27.3$$

per $800^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$

dove:

θ_a si riferisce alla temperatura, espressa in centigradi, nell'acciaio.

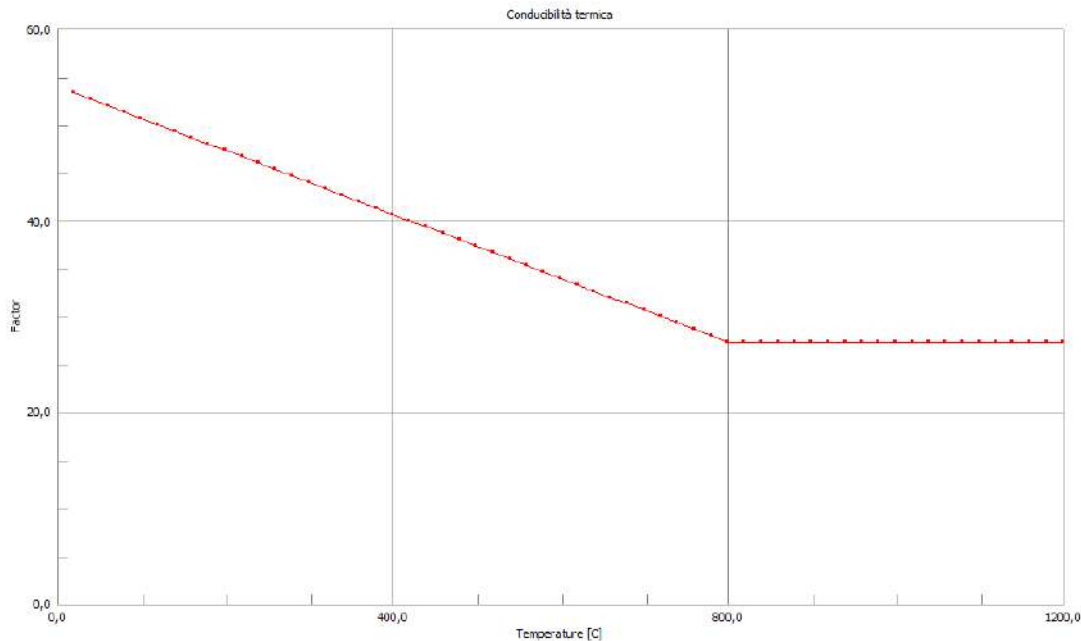


Figura 10-4 Conducibilità termica

11 ANALISI TERMICA SEMPLIFICATA PER SEZIONI IN ACCIAIO

Considerando l'elevata diffusività dell'acciaio durante l'incendio, che possiede un numero di Biot minore di 0,1, l'Eurocodice 1993-1-2 riporta delle prescrizioni operative al fine di fissare il campo di temperatura uniforme, in funzione del tempo, all'interno delle membrature metalliche:

- Membrature interne al compartimento avvolto dalle fiamme, in cavità difese da schermi;
- Membrature esterne al compartimento in cui ha luogo l'incendio, più o meno difese da schermi;
- Membrature interne al compartimento lambito dalle fiamme, avvolte da elementi protettivi
- Membrature interne al compartimento in cui si sviluppa l'incendio, non protette da nessun tipo di protettivo.

11.1 SEZIONI IN ACCIAIO NON PROTETTE

L'Eurocodice EN 1993-1-2, per ciò che concerne un simile tipo di elementi strutturali, riporta una relazione rassomigliante a quella ricavata precedentemente per i materiali non protetti, distinti da una distribuzione uniforme della temperatura, ipotesi che può essere data come realistica e veritiera a causa dell'elevato valore di conducibilità:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{h_{net,d} \dot{A}_m}{c_a \rho_a V} \Delta t$$

Dove:

- V è il volume riscaldato;
- A_m/V è il fattore di sezione della membratura non protetta;
- Δt è l'intervallo di tempo considerato inferiore a 5 secondi;
- k_{sh} è il coefficiente non superiore all'unità che tiene conto dell'effetto ombra sull'irraggiamento dei profilati;
- $\Delta\theta_{a,t}$ è l'incremento di temperatura nell'acciaio nell'intervallo di tempo Δt
- A_m è la superficie dell'acciaio esposto all'incendio;
- c_a è il calore specifico dell'acciaio;
- ρ_a è la densità dell'acciaio.

Per il coefficiente k_{sh} è fornita tali espressioni:

$$k_{sh} = 0.9 \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)^b}{\frac{A_m}{V}}$$

Con sezioni a doppio T coinvolte in incendi nominali:

$$k_{sh} = \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)^b}{\frac{A_m}{V}}$$

Nelle restanti situazioni:

Se il coefficiente assume un valore unitario, allora si avranno analisi del tipo conservativo.

Il pedice b , invece, si riferisce al fattore di sezione del profilato convesso che involupa la sezione.

$\dot{h}_{net,d}$ è la potenza termica netta subita dalla membratura per unità di superficie ed è ricavato dall'espressione:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{net,d} &= \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \\ &= \alpha_c (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) + \varepsilon_{res} \phi \sigma \left[(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_{a,t} + 273)^4 \right] \end{aligned}$$

Dove:

- $\theta_{a,t}$ è la temperatura uniforme della membratura di acciaio all'istante t

- $\vartheta_{g,t}$ è la temperatura del gas in prossimità della membratura all'istante t
- ϵ_{res} è l'emissività risultante pari a $\epsilon_a \epsilon_f$
- ϵ_f è l'emissività delle fiamme
- ϵ_a è l'emissività dell'acciaio
- Φ fattore di configurazione
- σ è la costante di Stefan Boltzmann
- α_c è il coefficiente di trasmissione termica per convezione

Al fine di ottenere le curve di riscaldamento per l'acciaio al cambiare dei fattori di sezione A_m/V delle varie membrature, occorre:

- Fissare un incremento temporale pari ad un secondo;
- Porre $\epsilon_a = 0.7$;
- Porre $\epsilon_f = 1.0$,
- Ipotezzare un programma termico per l'incendio del tipo standard (ISO 834);
- Fissare un fattore di configurazione Φ ;
- Fissare un coefficiente pari ad 1;
- Utilizzare un coefficiente di trasmissione termica per convezione di $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Verranno qui riportati i fogli di calcolo usati per definire le membrature del deposito automatizzato preso in esame nei successivi capitoli.

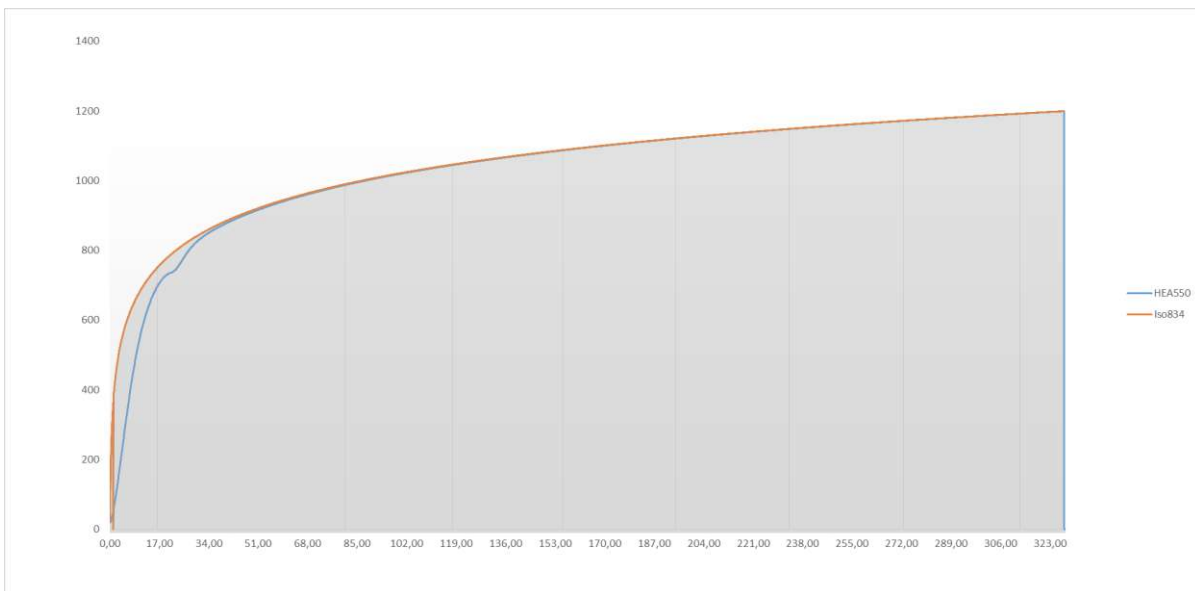
Saranno riportati estratti inerenti ai calcoli iterativi per un profilato tipo IPE 360 e, successivamente, le curve per tutti gli elementi, non considerando i calcoli.

dt	4	em	0,7	σ	5,67E-08
αc	25	εf	1	φ	1
Hnet,c	0	Hne,r	0	Hnet,d	0
	885,4626989		169,2164057		1054,679
	2196,047241		543,5171715		2739,564
	3153,377951		938,674454		4092,052
	3902,454845		1339,718788		5242,174
	4513,436306		1739,774126		6253,21
	5025,72786		2135,447408		7161,175
	5463,724924		2525,020003		7988,745
	5843,609812		2907,640654		8751,25
	6176,686418		3282,930527		9459,617
	6471,175298		3650,776293		10121,95
	6733,250842		4011,216		10744,47
	6967,67504		4364,373633		11332,05
	7178,202732		4710,420496		11888,62

Sezione	Dimensioni					
	Parametro	[m]				
CODICE SEZIONE	B1	0,17				
	B2	0,17				
	D	0,36				
	T1	0,0127	Da straus O SAGOMARIO			
	T2	0,0127	A[m2/m]	V[m3/m]	A/V	(A/V)box
	T3	0,008	1,353	0,00727	186,11	125

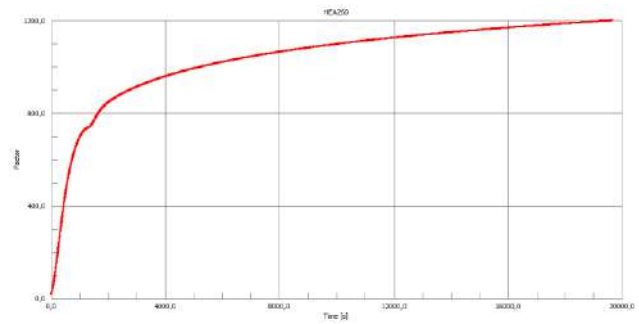
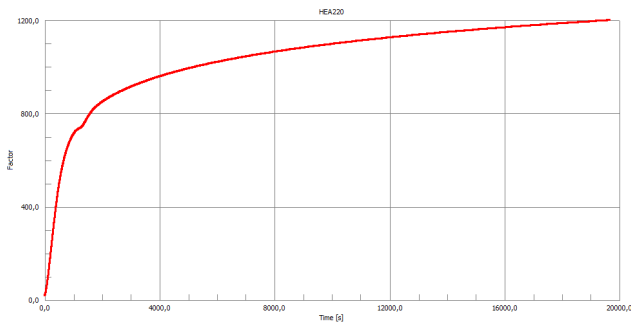
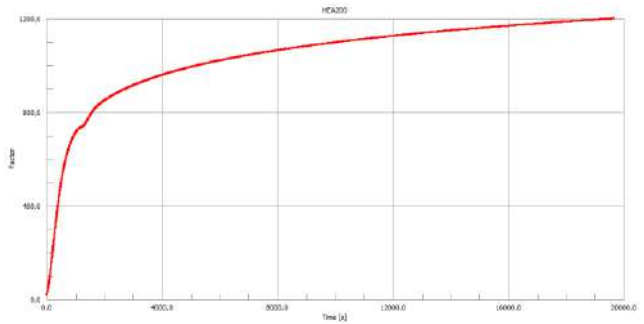
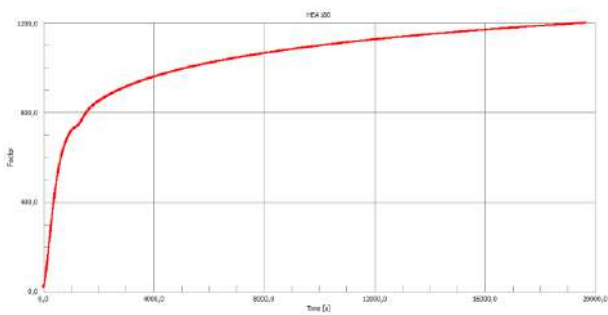
Sezioni				
	L o TT	Convesse(cave rett. O circ.)	Soluzione cautelativa	Altro
ksh	0,604490022	1	1	0,67166

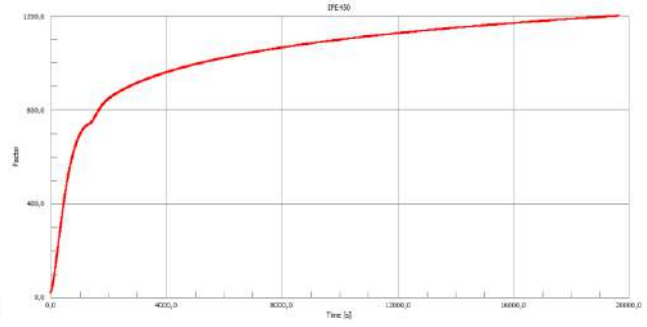
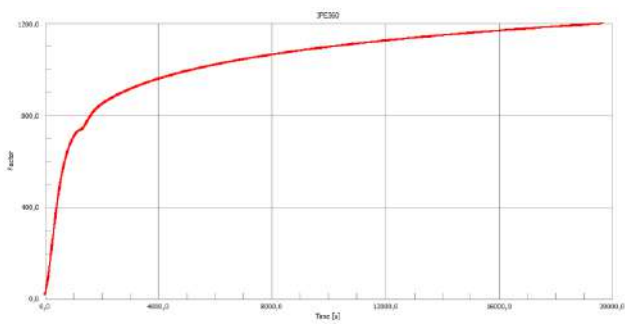
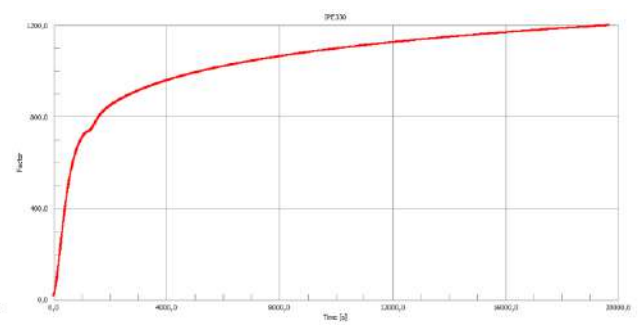
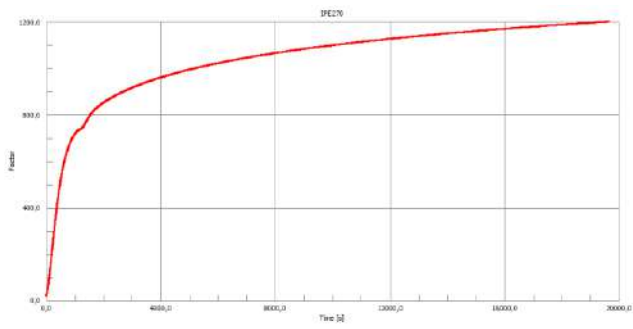
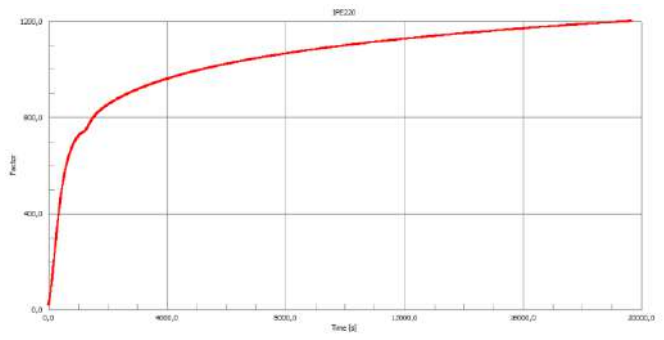
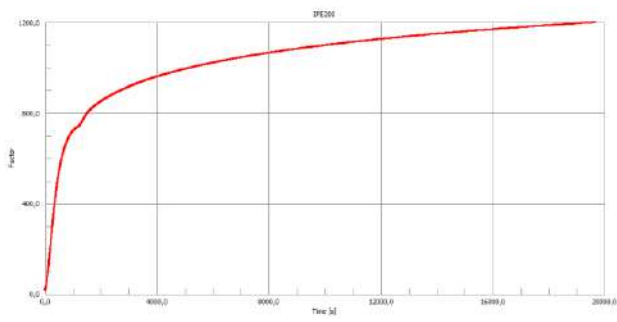
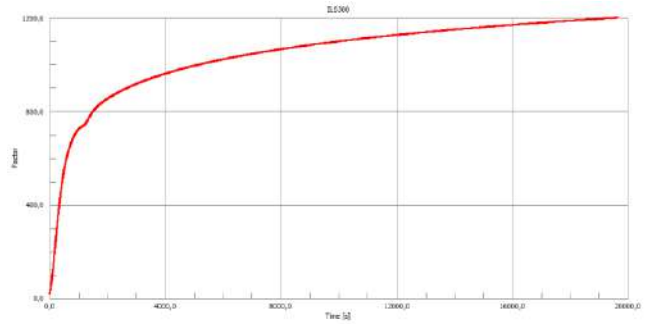
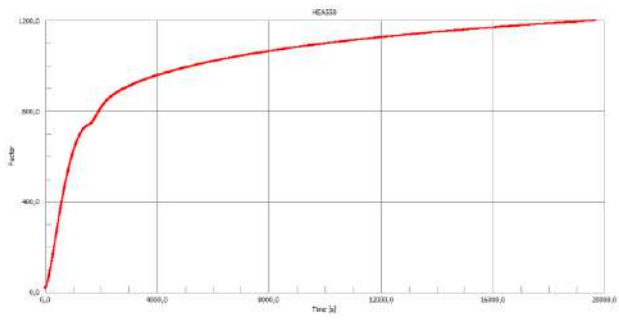
Temo min	Dt+t	Tempo s	Iso834	Temperatura prevista	Calore specifico
0,00	0,00	0	20	20	439,80176
0,07	0,03	4	55	20	439,80176
0,13	0,10	8	108	20	439,9624985
0,20	0,17	12	147	21	440,3791207
0,27	0,23	16	178	22	440,9988293
0,33	0,30	20	203	23	441,78811
0,40	0,37	24	225	24	442,7228504
0,47	0,43	28	244	26	443,7843276
0,53	0,50	32	261	27	444,9572604
0,60	0,57	36	276	29	446,2287434
0,67	0,63	40	290	31	447,5876137
0,73	0,70	44	303	33	449,024047
0,80	0,77	48	314	36	450,5292878
0,87	0,83	52	325	38	452,0954608
0,93	0,90	56	335	41	453,7154334
1,00	0,97	60	345	43	455,3827135
1,07	1,03	64	354	46	457,0913695
1,13	1,10	68	362	49	458,835968
...

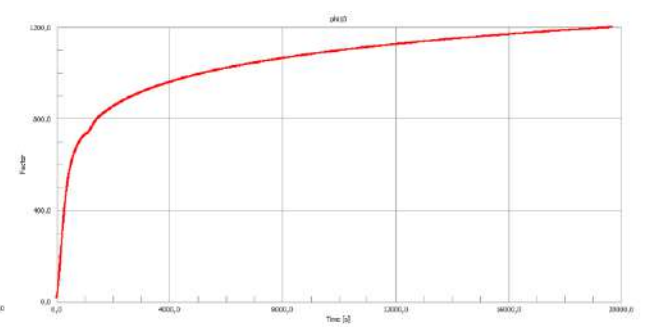
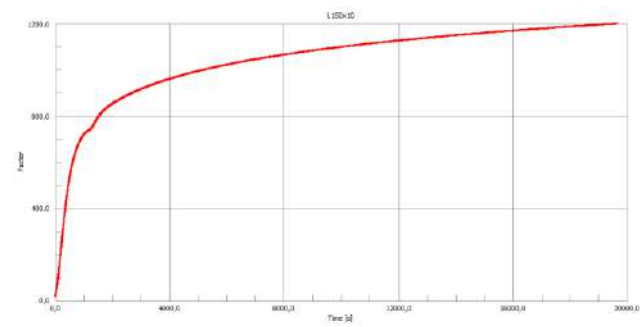
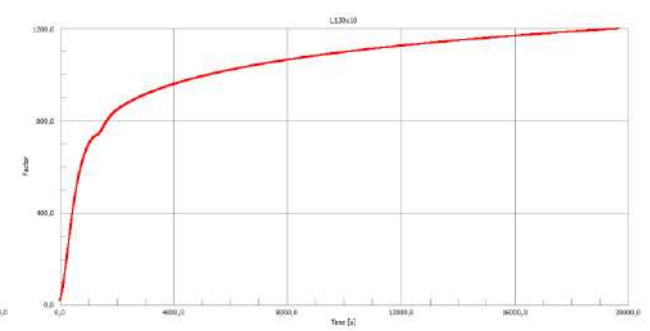
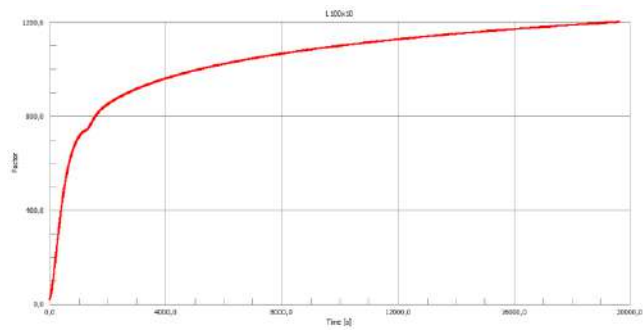
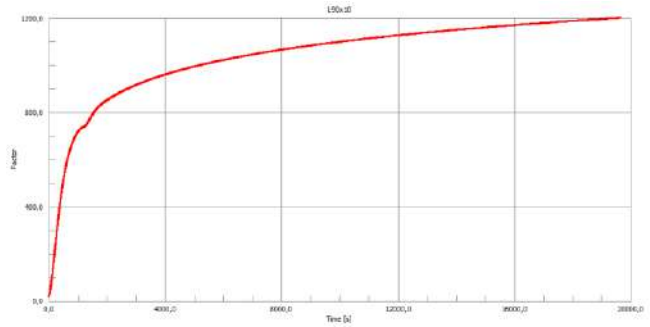
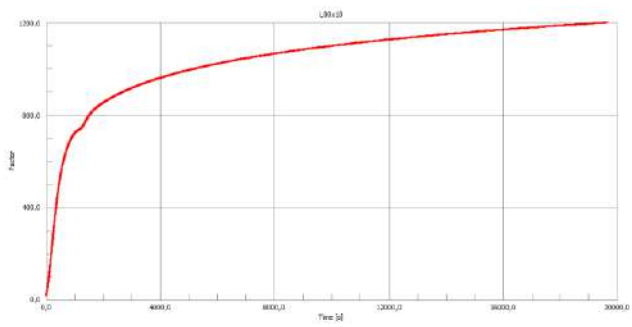
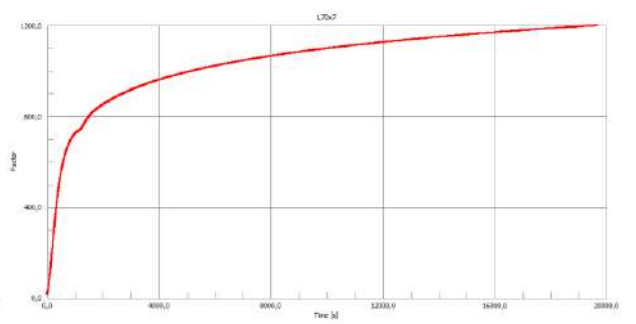
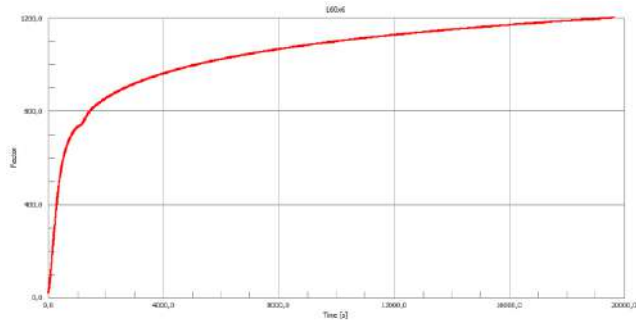


DT	Ta
0	20
0,227124618	20
0,589748286	21
0,880066111	22
1,12583513	23
1,340571096	24
1,531980355	26
1,704933424	27
1,862741744	29
2,007783311	31
2,141840012	33
2,266293229	36
2,382243955	38
2,490590047	41
2,592077857	43
2,687337887	46
2,776910087	49
2,861262263	51
...	...

Si riportano le restanti curve implementate su Straus7 per le successive analisi







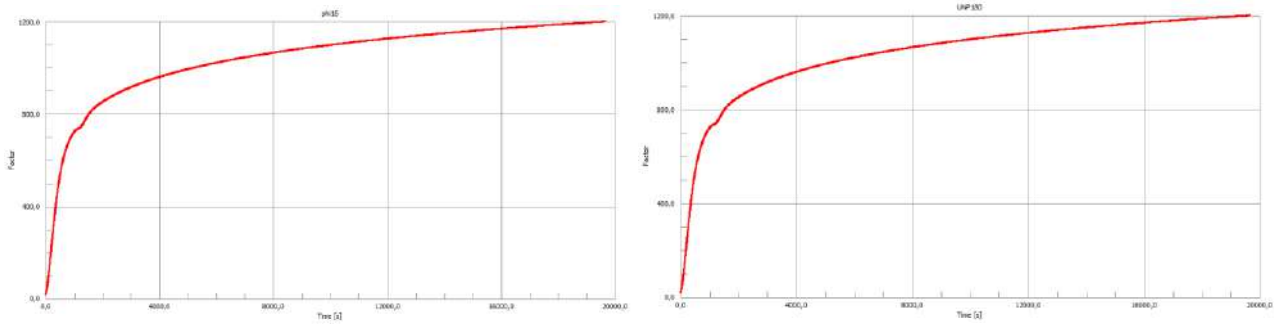


Figura 11-1 Curve di riscaldamento

11.2 SEZIONI IN ACCIAIO PROTETTE

L'Eurocodice EN 1993-1-2 riporta una relazione utile per questo tipo di elementi strutturali, efficace per i materiali protetti, aventi normalmente una distribuzione uniforme della temperatura.

Qui di seguito sarà riportata solo la suddetta relazione e si rimanda all'Eurocodice per ulteriori analisi:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 - \frac{\phi}{3}} \Delta t - (e^{\frac{\phi}{10}} - 1) \Delta\theta_{g,t}$$

12 ANALISI TERMICA AVANZATA PER SEZIONI IN ACCIAIO

Ai fini di un'individuazione della temperatura negli elementi con una distribuzione uniforme o meno, è consigliato l'impiego di metodi di calcolo avanzati, fondati sulla formulazione agli elementi finiti.

In questo caso, è utilizzato il software di calcolo agli elementi finiti Straus7.

Si seguita un'analisi transiente non lineare per tenere conto delle non linearità indotte dal variare di:

- Conducibilità termica;
- Calore specifico.

È fissato un lasso temporale di 30 minuti e un valore della temperatura ambiente di 20°C.

Si valuta una sezione tipo Universal Column 356x406x634 kg/m per confrontare i risultati ottenuti da Straus7 con quelli in letteratura, in cui l'analisi FEM è stata effettuata per mezzo di SAFIR.

Si valuta la sezione in fiamme su tutti e quattro i lati, oltre alla temperatura dei gas, sorvegliata dalla ISO834.

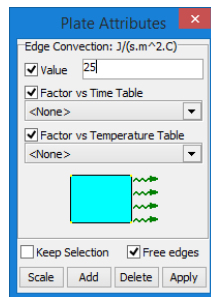
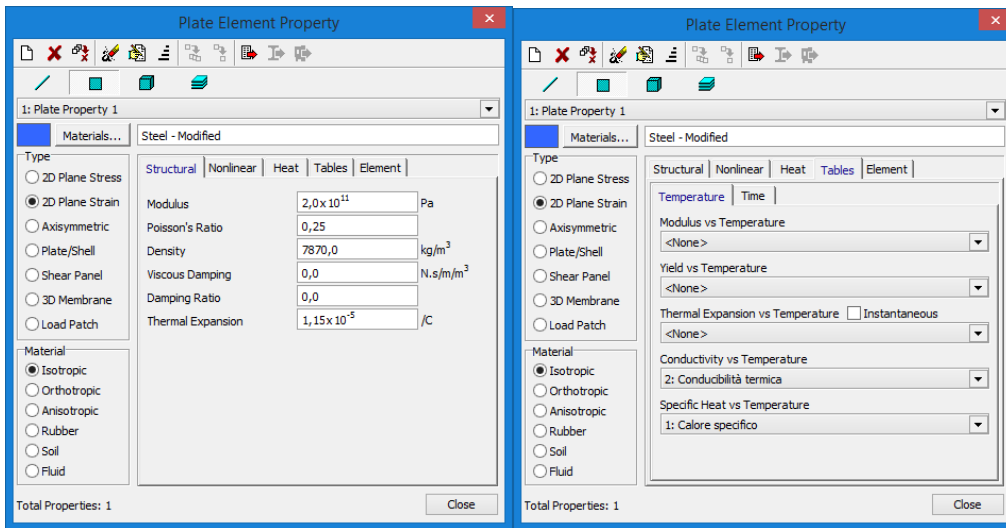


Figura 12.1 Settaggi Straus7

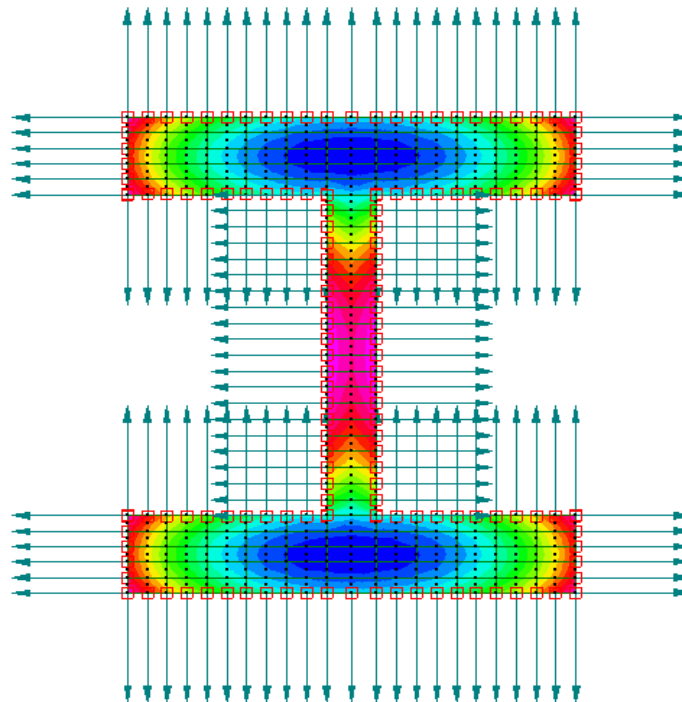


Figura 12.2 Isotherme profilo

La temperatura del nodo al centro dell'anima è di 440°C

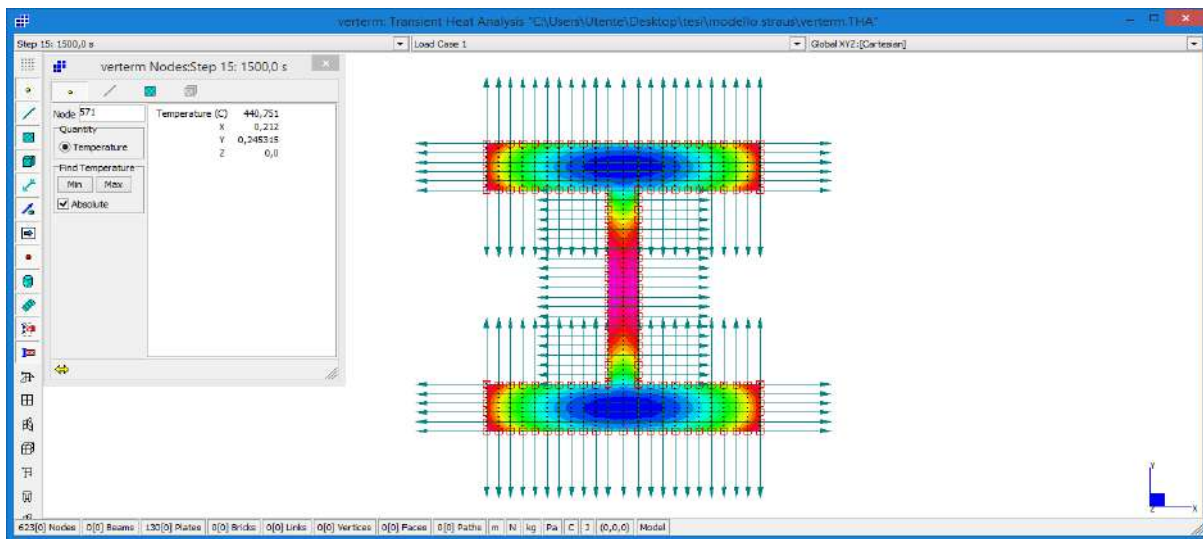


Figura 12.3 Temperatura nodo

La temperatura del nodo al centro dell'ala è di 351°C

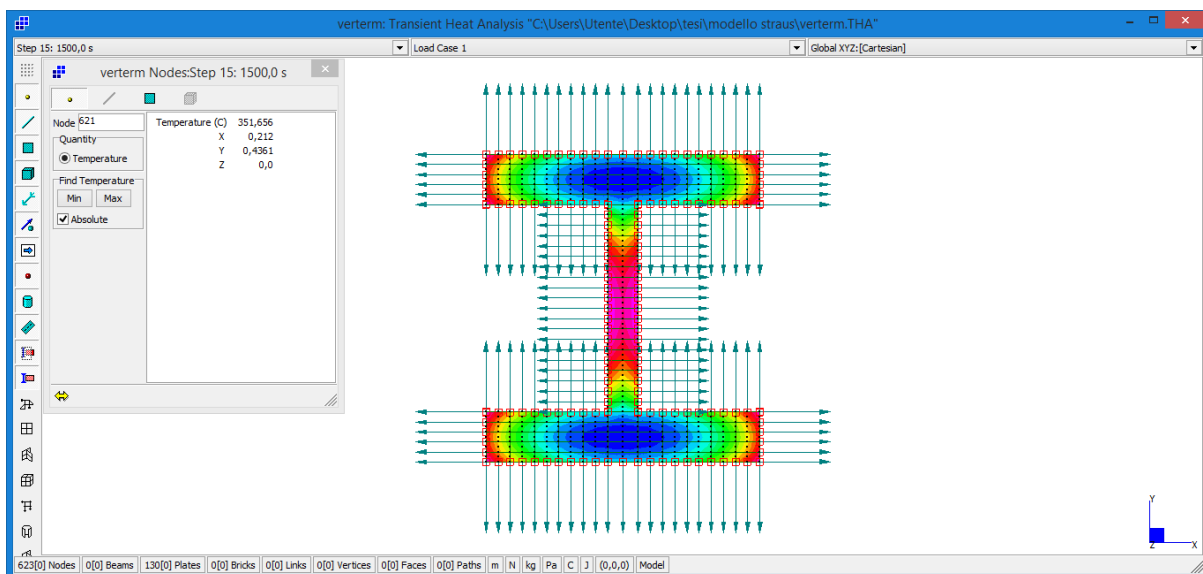


Figura 12.4 Temperatura nodo

La figura sopra riportata evidenzia le isoterme della stessa sezione, le quali sono state ottenute per mezzo di SAFIR ed evidenziano differenze di temperatura superiori a 100°C all'interno della sezione. La differenza più grande è da ricercare fra le elevate temperature che si trovano nell'anima più sottile e quelle minori, sviluppate nelle ali spesse. Le temperature più uniformi si registrano nelle sezioni più leggere e negli elementi protetti, consequenzialmente ad un graduale aumento della temperatura.

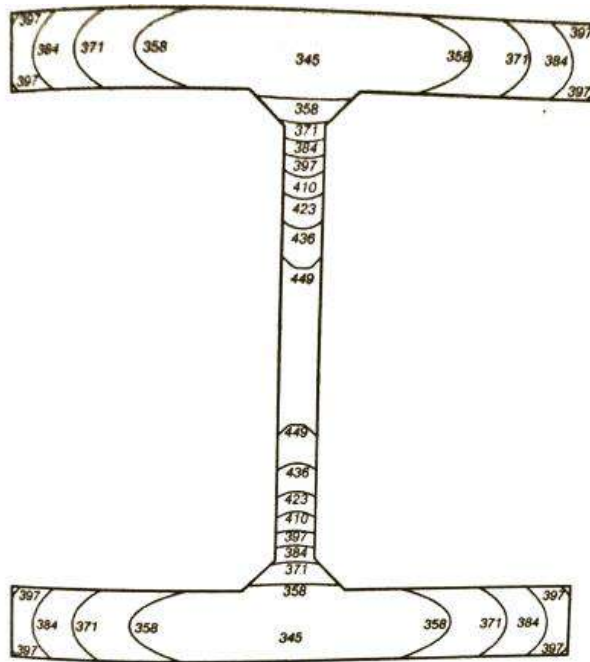


Figura 12.4 Isoterme Safir

Con un confronto, si evidenzia come l'analisi eseguita da Straus7 ha una differenza di temperatura, rispetto a quella determinata in letteratura ed eseguita da SAFIR, pari a:

- +6°C nei nodi sulle ali;
- -9°C nei nodi sull'anima.

Poiché la variazione della temperatura è minima nei confronti dell'analisi in letteratura presa come punto di riferimento, si afferma la validità delle analisi, eseguite con Straus7, che seguiranno.

13 VALIDAZIONE ANALISI TERMICA

Si continua con la validazione delle analisi termiche.

In questo caso, la soluzione di riferimento non è presa da letteratura, ma dalle relazioni, individuate sugli Eurocodici, riguardo a sezioni non protette.

Inoltre, si confronteranno i risultati anche con il nomogramma.

Eseguiamo un'analisi termica transiente non lineare con Straus7, esaminando una sezione tipo HEA550 sotto carico termico standard a temperatura ambiente di 20°C.

A temperatura ambiente si ha la seguente soluzione:

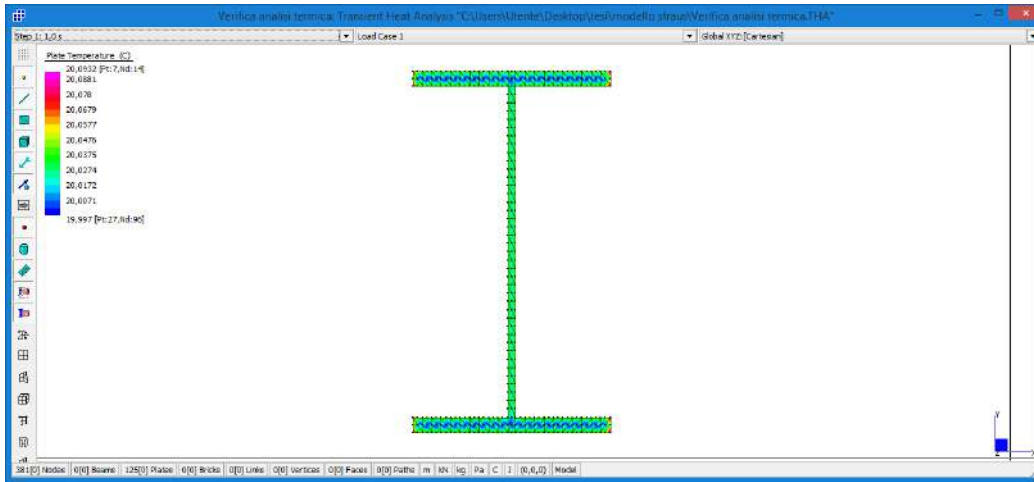


Figura 13.1 Discretizzazione profilo

A 900s la temperatura massima è di circa 564°C

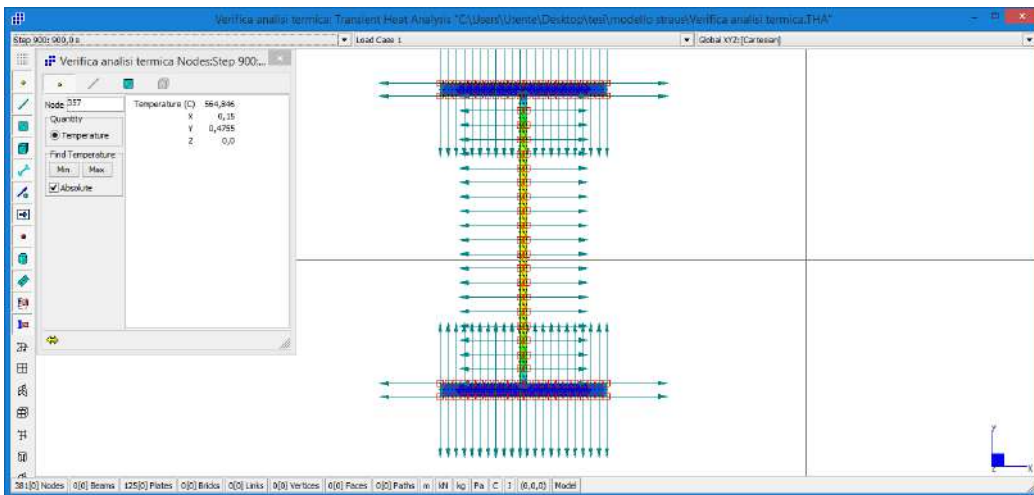


Figura 13.2-Temperatura nodo

A 1800s la temperatura massima è di circa 766°C

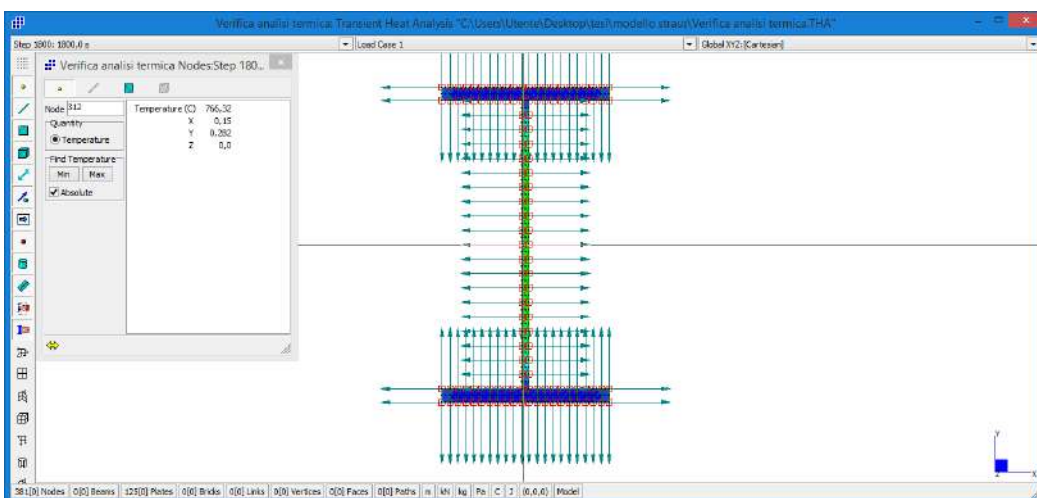


Figura 13.3-Temperatura nodo

Si confrontano questi valori con quelli del nomogramma:

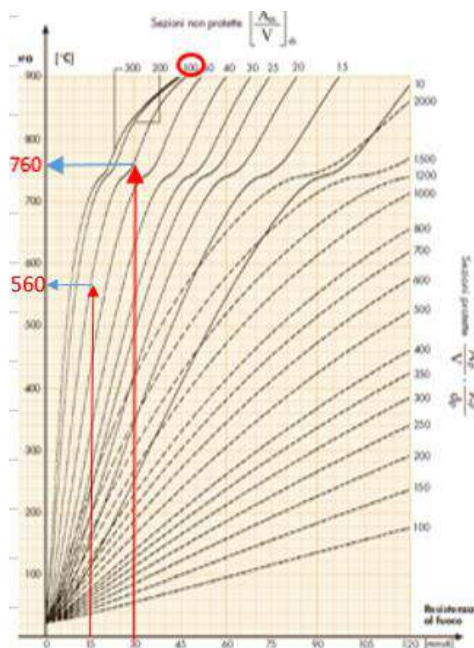


Figura 13.4 Nomogramma

Poiché il confronto dimostra una differenza di temperatura intorno i 5°C, è possibile affermare la validità dell'analisi svolta.

Di seguito si utilizzeranno le equazioni semplificate, individuate dall' Eurocodice ai fini dell'analisi termica delle membrature in acciaio non protette a temperatura uniforme e coefficiente k_{sh} , sia pari a uno, sia calcolato con l'espressione dell'EC.

NOMOGRAMMA		
	k=1	k effettivo
0	20	20
4	20,12728	20
8	20,45819	20
12	20,95292	21
16	21,58721	21
20	22,34428	22
24	23,21166	22
28	24,17955	23
32	25,23998	24
36	26,38627	24
40	27,61271	25
44	28,91431	26
48	30,28669	27
52	31,72593	28
56	33,22849	29
60	34,79117	30
64	36,41103	31
68	38,08537	33
72	39,8117	34
76	41,58772	35
...

Figura 13.5-Fattore d'ombra

Si riporta il confronto con i valori di temperatura individuati su Straus7 per le ali e per l'anima.

HEA550						NOMOGRAMMA		
ANIMA		ALA BASSA		ALA ALTA		k=1		k effettivo
1	20,05115	1	20,04382	1	20,04149	0	20	20
2	20,11817	2	20,10531	2	20,10249	4	20,12728	20
3	20,20619	3	20,17702	3	20,17448	8	20,45819	20
4	20,31269	4	20,25653	4	20,25464	12	20,95292	21
5	20,43687	5	20,34303	5	20,34193	16	21,58721	21
6	20,57777	6	20,43618	6	20,4359	20	22,34428	22
7	20,73457	7	20,5358	7	20,53632	24	23,21166	22
8	20,90656	8	20,6418	8	20,64308	28	24,17955	23
9	21,09311	9	20,75409	9	20,75609	32	25,23998	24
10	21,29363	10	20,87261	10	20,87526	36	26,38627	24
11	21,5076	11	20,99729	11	21,00053	40	27,61271	25
12	21,73453	12	21,12806	12	21,13184	44	28,91431	26
13	21,974	13	21,26486	13	21,2691	48	30,28669	27
14	22,22559	14	21,4076	14	21,41225	52	31,72593	28
15	22,48892	15	21,55621	15	21,56121	56	33,22849	29
16	22,76365	16	21,71061	16	21,71591	60	34,79117	30
17	23,04945	17	21,87074	17	21,87627	64	36,41103	31
18	23,34602	18	22,0365	18	22,04221	68	38,08537	33
19	23,65307	19	22,20782	19	22,21366	72	39,8117	34
20	23,97032	20	22,38461	20	22,39053	76	41,58772	35
21	...	21	...	21

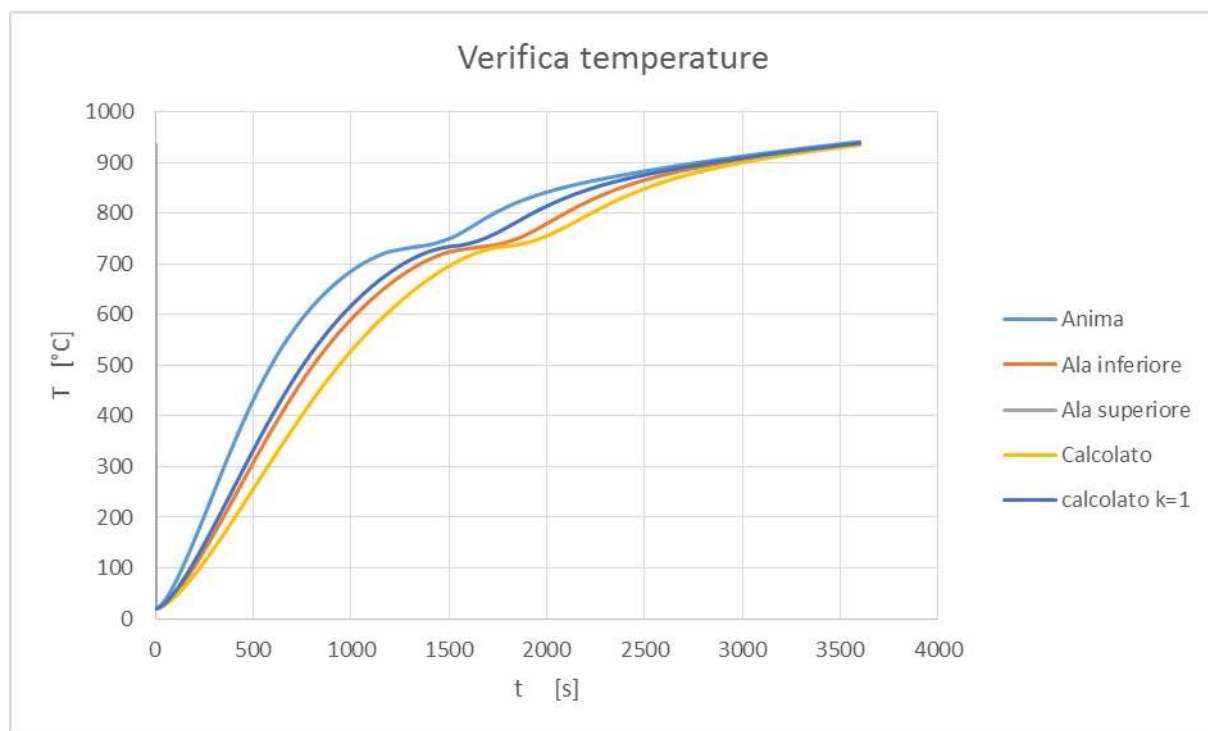


Figura 13.6-Temperature ai nodi per le ali e l'anima del profilo

Si nota che il valore calcolato con espressione semplificata per $k_{sh}=1$ si colloca tra le curve ottenute con Straus7 per l'ala inferiore e per l'anima.

Si utilizzeranno, quindi, tali curve di riscaldamento del materiale come input al modello FEM, da applicare ai nodi.

In questo modo, si passa dalla curva ISO834, rappresentativa della temperatura dei gas e che richiederebbe un'analisi che consideri dei fenomeni di convezione e irraggiamento per un'applicazione al modello Fem, ad una curva di riscaldamento, in cui le temperature tengono già in conto di questi fenomeni e che può essere applicata direttamente ai nodi.

ANALISI MECCANICA

Il presente capitolo riguarda le metodologie di progettazione strutturale antincendio e provvede a fornire gli opportuni strumenti ai fini del calcolo, inoltre chiarisce la rilevanza presentata dalle condizioni di vincolo e dai carichi ai fini dell'analisi della capacità portante durante un incendio. I calcoli sono soprattutto finalizzati a verificare le prestazioni in presenza del fenomeno d'incendio.

La struttura degli edifici è composta da diversi elementi, ciascuno avente le proprie funzioni statiche, come gli elementi di copertura, le travi, i controventi, le pareti e le colonne. Al fine di non permettere un collasso strutturale, ciascun componente ed ogni elemento deve garantire la propria funzione portante durante l'esplicitarsi dell'incendio. Con *collasso della struttura*, s'indica la condizione in cui il carico applicato supera la capacità portante.

Il collasso di un elemento, per ciò che concerne un vasto numero di strutture semplici e quelle isostatiche, è causa di un collasso strutturale. In strutture maggiormente complesse la struttura può vincere un incendio, seppur con l'eventuale perdita della capacità portante di uno o più elementi. Oltretutto, l'incendio è in grado di provocare una dilatazione degli elementi della struttura, a causa del calore che porta a delle influenze reciproche, non presenti nelle normali condizioni ambientali, fra strutture contigue.

1 PROGETTAZIONE STRUTTURALE IN CASO DI INCENDIO

Progettare le strutture contro un eventuale incendio è rassomigliante, dal punto di vista concettuale, alla progettazione in normali condizioni ambientali. La progettazione antincendio seguirà la metodologia dello stato limite ultimo.

Le principali dissomiglianze rispetto alla progettazione a normale temperatura ambiente sono varie:

- I processi del collasso sono diversi da quelli che si aspettano nelle condizioni abituali.
- La distribuzione delle diverse azioni interne è modificata più o meno pesantemente dalle dilatazioni termiche;
- Durante l'incendio, si registrano dei carichi più bassi rispetto a quelli utilizzati per l'abituale progettazione;
- Le resistenze presentate dai materiali si riducono a causa dell'elevata temperatura;

- Un'eventualità bassa che si verifichi l'evento comporta una diminuzione dei fattori di sicurezza;

1.1 METODI DI VERIFICA

La principale caratteristica per una progettazione antincendio è controllare che la resistenza al fuoco dell'edificio non risulti minore alla sollecitazione, la quale equivale al vigore dell'incendio che coinvolge la struttura. I valori di progetto $X_{d,fi}$ delle proprietà meccaniche, ovvero deformazione e resistenza, dei diversi materiali si determinano nel seguente modo:

$$X_{d,fi} = \frac{k_{\theta} X_k}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- $\gamma_{M,fi}$ indica il coefficiente parziale di sicurezza per le proprietà del materiale durante l'incendio, che per quanto riguarda l'acciaio equivale all'unità;
- X_k indica una proprietà di resistenza o deformazione (generalmente f_k oppure E_k) ai fini della progettazione a temperatura ordinaria, come stabilito dalla EN 1993-1-1-;
- k_{θ} si riferisce al fattore di riduzione per una caratteristica di resistenza o deformazione ($X_{k,\theta}/X_k$) in funzione della temperatura del materiale;

I valori di progetto $X_{d,fi}$ delle caratteristiche termiche dei vari materiali sono determinate in questo modo:

- Incremento delle proprietà in favore della sicurezza:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}}$$

- Aumento delle caratteristiche in maniera svantaggiosa per la sicurezza:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} X_{k,\theta}$$

In cui:

- $\gamma_{M,fi}$ indica il coefficiente parziale per le proprietà del materiale, durante l'incendio.
- $X_{k,\theta}$ si riferisce al valore di una proprietà del materiale nella progettazione contro l'incendio, solitamente in relazione alla temperatura acquisita dal materiale.

Quest'analisi è effettuabile secondo tre diverse metodologie:

- **Dominio del tempo**, per cui si deve soddisfare a seguente disequazione:

$$t_{fi,d} \leq t_{fi,d,t}$$

In cui:

- $t_{fi,d,t}$ indica il tempo utile per giungere al collasso dell'elemento;
 - $t_{fi,d}$ si riferisce alla durata dell'incendio, in cui la struttura deve preservare la sua funzionalità.
- **Dominio della temperatura**, per cui è necessario assicurare che all'interno dell'edificio non si giunga ad una temperatura che sia superiore a quella del collasso. Per tale verifica, bisogna rispettare questa disequazione:

$$\theta_{d,t} \leq \theta_{cr,d}$$

In cui:

- $\theta_{cr,d}$ indica la temperatura capace di portare al collasso strutturale;
- $\theta_{d,t}$ indica la temperatura massima che può essere raggiunta dall'elemento nel mezzo dell'incendio. Questo valore è fissato con un'analisi termica della struttura esposta alla curva di incendio di progetto.

Il dominio della temperatura è applicato come verifica per gli elementi che fungono da isolanti termici.

- **Dominio della resistenza**, fondato sul confronto fra la sollecitazione causata dal carico e la capacità portante dell'elemento della struttura. Quest'analisi è applicabile con la disequazione:

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

Dove:

- $E_{fi,d}$ indica la sollecitazione indotta dal carico applicato nell'incendio;
- $R_{fi,d,t}$ indica la minima capacità portante che viene registrata dalla struttura durante l'incendio. Questo valore si calcola a partire dall'analisi termica eseguita in varie fasi successive dell'incendio, per poi svolgere l'analisi strutturale, dopo aver affidato ad ogni materiale le proprietà meccaniche, adeguatamente diminuite sulla base del profilo delle temperature che è stato precedentemente calcolato.

2 AZIONI SULLE STRUTTURE IN CONDIZIONI DI INCENDIO

Le metodologie riguardanti la sicurezza della struttura sono fondate sul procedimento semiprobabilistico agli stati limite. Si tiene conto dell'incendio come un'azione eccezionale: per tale motivo le regolamentazioni fissano una condizione di progetto

eccezionale per l'edificio, chiamata "accidental design situation", equivalente allo stato limite ultimo.

L'analisi delle sollecitazioni che agiscono nell'incendio si fonda su un'adeguata combinazione di carico, fissata dalla formula:

$$F_{fi,d} = \gamma_{GA} G_K + \gamma_p P_K(t) + \Psi_{2,1} Q_{K,1} + \sum_i \Psi_{2,i} Q_{K,i} + \sum_i A_d(t)$$

In cui:

- $Q_{k,1}$ è il valore caratteristico dell'azione variabile principale;
- G_k è il valore caratteristico delle azioni permanenti;
- $Q_{k,i}$ è il valore caratteristico delle altre azioni variabili;
- $\Psi_{2,1}$ è il coefficiente di combinazione per il valore frequente dell'azione variabile principale;
- A_d è il valore di progetto dell'azione termica indiretta dovuta all'incendio;
- P_k è il valore caratteristico dell'azione di precompressione.

Laddove **non fosse indispensabile** la valutazione esplicita delle azioni indirette, conseguenza dall'incendio, come nel caso di un'analisi ai singoli elementi, i risultati delle azioni meccaniche $E_{fi,d}$ si possono valutare partendo dalle azioni di progetto allo stato limite ultimo e a temperatura ordinaria E_d per mezzo della seguente relazione:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d$$

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \Psi_{1,1} \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \xi} = \frac{1 + \Psi_{1,1} \xi}{1.4 + 1.5 \xi} \quad \text{con } \xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k}$$

Per ξ risulta:

$$\eta_{fi} = 0.5 \div 0.7$$

Le azioni indirette causate dall'incendio si possono mettere in secondo piano durante l'analisi della resistenza quando:

- Sono a priori non rilevanti o in favore della sicurezza;
- Sono considerate implicitamente con modelli e condizioni vincolari in favore di sicurezza e/o comprese nel calcolo, per effetto dei requisiti di sicurezza contro l'incendio delineato in maniera conservativa.

L'Eurocodice 1 parte 1-2 consiglia che siano considerate le situazioni sotto riportate, in modo da stimare eventuali azioni indirette nella fase d'incendio:

- Una diversa espansione termica negli elementi staticamente indeterminati, come nel caso di solette continue;
- Un'espansione termica contrastata dagli elementi stessi, come le colonne presenti all'interno di un edificio a più piani, avente una struttura intelaiata con pareti rigide;
- Dei gradienti termici nelle sezioni trasversali, causanti tensioni di coazione;
- Un'espansione termica di elementi contigui, come lo spostamento della testa appartenente ad una colonna, a causa dell'espansione del solaio;
- Un'espansione termica di elementi che ne sollecitano altri posti fuori dal compartimento antincendio.

3 METODI DI CALCOLO

La verifica del trasferimento del calore all'interno delle membrature e la modellazione della struttura rappresentano i principali aspetti tipici della complessità della progettazione antincendio.

La scelta iniziale si basa sul tipo di approccio da applicare: prestazionale, come nella modellazione di incendi reali attraverso delle metodologie di varia complessità, oppure prescrittivo, come nel caso degli incendi nominali.

Successivamente si passa alla selezione del modello della struttura: analisi di ogni membratura, delle varie parti della struttura oppure della medesima nel suo insieme. Per ciò che concerne i modelli strutturali parziali, ovvero i singoli elementi della struttura o parti di struttura, è necessario fissare le condizioni al contorno per effettuare l'analisi.

L'ultima fase è data dalla selezione dei processi per le analisi termiche e/o per le verifiche della struttura: il progettista sceglie quale metodo adottare (semplificato, avanzato o tabellare).

L'applicazione dei vari metodi di verifica semplificati è subordinata alla valutazione approssimativa della resistenza delle singole membrature. Generalmente, risultano adeguati alle singole membrature negli incendi standard, dal momento che i modelli strutturali semplificati sono caratterizzati da una semplificazione delle condizioni al contorno, le quali non permettono al progettista di comprendere i risultati trascurati del comportamento della struttura nel suo complesso.

Alcuni fra i modelli semplificati, solo in eventualità molto rare, possono essere utilizzati per gli incendi non standard, ma a patto di dimostrare che la distribuzione della temperatura all'interno delle sezioni trasversali è meno complessa rispetto a

quelle date dall'esposizione all'incendio standard, lavorando in condizioni di sicurezza.

L'incendio standard, infatti, rappresenta un cimento termico solitamente più gravoso rispetto a quello effettivo. I metodi semplificati, inoltre, sono generalmente ammessi per l'applicazione dei metodi di verifica semplificati ai sottosistemi strutturali negli incendi nominali.

I metodi avanzati, invece, permettono un'analisi della struttura più accurata e sono utilizzabili in ogni eventualità, dal momento che costituiscono lo strumento esclusivo nel caso di verifiche sulle strutture nel loro complesso.

4 ANALISI DI MEMBRATURE

Gli Eurocodici permettono di effettuare un'analisi strutturale su ogni membratura ricavata da manufatti più complessi. Le normative da seguire per applicare tale livello di semplificazione sono:

- Estrarre la membratura solo in caso di ripristino delle condizioni a contorno. Le condizioni di vincolo in relazione al tempo $t=0$ che si verificano all'inizio devono rimanere uguali, anche durante l'incendio. Ciò vale a dire che è permesso modellare la membratura con una previsione ai "vincoli equivalenti" che si ricavano a freddo. Per i vincoli equivalenti si intendono dei vincoli che riproducono le caratteristiche di rigidezza;
- Per determinare, oltre alla verifica struttura, le caratteristiche della sollecitazione e le sollecitazioni agli estremi durante l'incendio ($E_{d,fi}$), è possibile diminuire adeguatamente le sollecitazioni ricavate dalle verifiche a freddo (E_d) per mezzo di un coefficiente riduttivo η_{fi} ;
- Per conoscere le azioni sull'elemento, ovvero quelle derivanti dalle deformazioni termiche che sono impedito, è possibile considerare solo quelle ricavate da gradienti termici lungo le sezioni della struttura, tralasciando le distorsioni termiche piane e di tipo assiale.

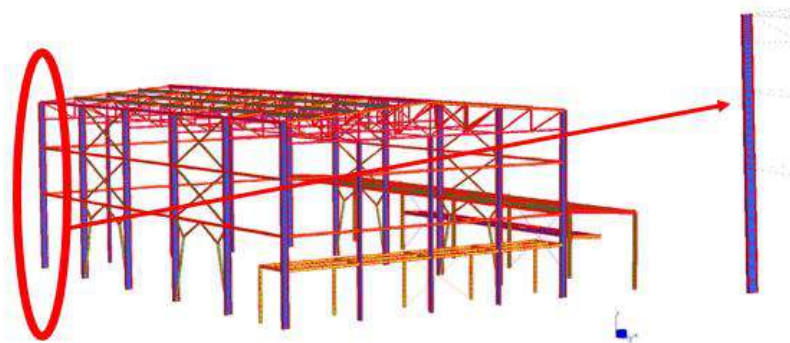


Figura 4.1 Analisi membratura

L'analisi delle singole membrature, tratte dalla struttura per mezzo di regole semplificate, è conservativa. Proprio per questo, le analisi permesse su ogni elemento strutturale derivano dall'uso degli incendi nominali, i quali possiedono la capacità di essere riprodotti in maniera semplice e di risultare conservativi nei confronti degli incendi effettivi. Per quanto riguarda gli incendi reali, invece, l'uso di metodi semplificati alla verifica della loro conservatività risulta in funzione delle analisi che contemplano un incendio standard. Il metodo tabellare, oltretutto, non può essere applicato per quanto riguarda gli incendi reali, dal momento che non è possibile un'adeguata sperimentazione, mentre i nuovi metodi avanzati risultano sempre utilizzabili.

5 ANALISI DI PARTI DI STRUTTURA

Per quanto riguarda i sottoinsiemi strutturali tratti dai manufatti più complessi, è permessa un'analisi in condizioni d'incendio. Le normative degli Eurocodici assumono tre modi per applicare questo livello di semplificazione:

- Il sottosistema può essere estratto solo in caso di ripristino di adeguate condizioni al contorno. Le condizioni iniziali di vincolo in funzione del tempo $t=0$ devono rimanere uguali anche durante lo sviluppo dell'incendio: vale a dire che si è in grado di modellare la sottostruttura, tenendo conto dei *vincoli equivalenti* derivati a freddo. Per ciò che concerne tali vincoli, essi possono essere verificati per mezzo di un programma di calcolo. Inoltre, occorre localizzare la porzione della struttura da verificare, conoscendo le potenziali interferenze con la struttura rimanente, tenendo conto delle deformazioni e delle espansioni termiche;
- Per la definizione delle proprietà della sollecitazione e delle sollecitazioni agli estremi durante lo sviluppo dell'incendio ($E_{d,fi}$), occorre diminuire idoneamente le sollecitazioni ricavate per le verifiche a freddo (E_d), utilizzando un coefficiente riduttivo η_{fi} ;

- Occorre considerare ogni azione indiretta che avviene nelle sottostrutture, ma anche il declino delle caratteristiche meccaniche dei materiali, le rigidità esistenti e l'eventuale meccanismo di collasso.

L'analisi dei sottosistemi, estrapolati dalla struttura per mezzo di opportune norme semplificate, deve essere di tipo conservativo e, dunque, si tratta di quelle che derivano dall'utilizzo degli incendi nominali. Per quanto riguarda, invece, gli incendi reali, è permesso l'uso dei metodi avanzati.

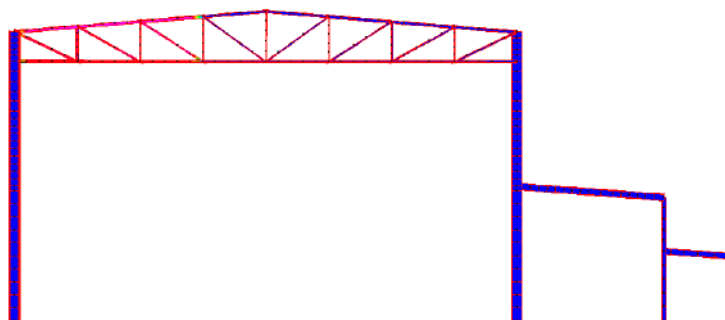


Figura 4.2-Analisi di sottostrutture

6 ANALISI DI INTERE STRUTTURE

Si tratta sicuramente della più completa fra le analisi strutturali, effettuabile sia con un approccio prestazionale, sia per mezzo di regole prescrittive. I metodi di calcolo avanzati sono applicabili, in quanto tengono in conto delle caratteristiche dei materiali e della loro modifica con il progredire della temperatura, ma anche delle distorsioni termiche, della rigidità di ogni membratura e di possibili meccanismi di collasso parziali. Ovviamente, per essere applicate, si deve disporre di un'eccellente specializzazione del progettista, oltre che di un'importante potenza di calcolo.

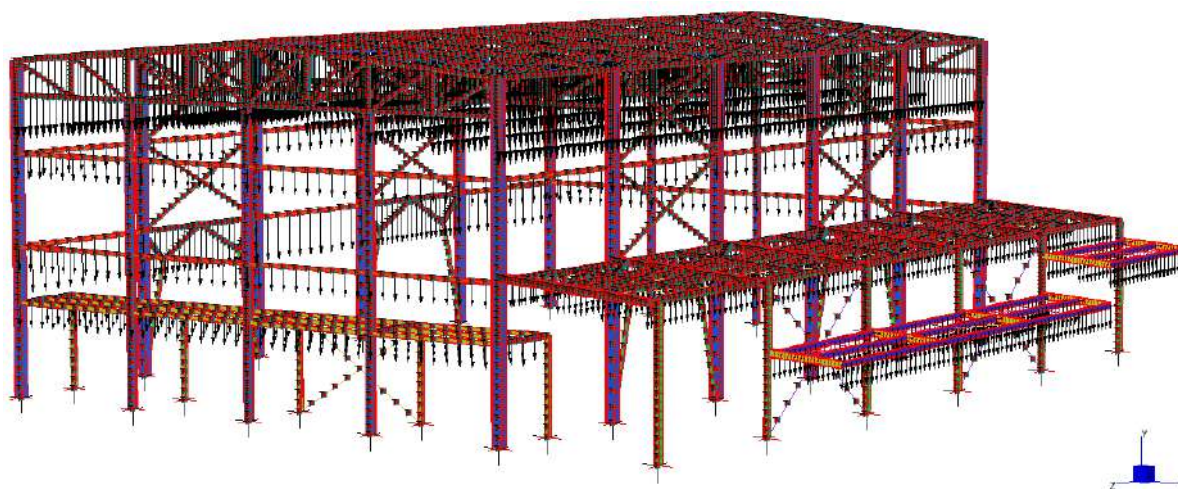


Figura 4.3-Analisi della struttura

7 PROGETTO DI STRUTTURE SOGGETTE AD INCENDIO

Solitamente, si conduce un'analisi strutturale che considera un comportamento elastico lineare, che può essere considerato tale quando le deformazioni sono direttamente proporzionali ai carichi applicati, mentre le strutture devono riprendere il loro aspetto originario nel momento in cui vengono private dei vari carichi: si tratta di un'approssimazione adeguata, avente livelli di carico opportunamente bassi.

Per quanto riguarda le abituali temperature, vi sono due motivi principali di non linearità nell'analisi strutturale:

- Le non linearità dei materiali, evidenziate nel momento in cui i materiali vengono sollecitati al di là del campo di risposta elastica, producendo comportamenti di tipo plastico, che comportano una definitiva deformazione anche dopo la rimozione dei vari carichi, oppure degli snervamenti;
- Le non linearità geometriche, che si evidenziano nel momento in cui le deformazioni sono tali da apportare delle azioni interne addizionali, mentre i carichi sono applicati nella deformata.

Per definire la resistenza ultima della struttura, è necessaria la comprensione di non linearità che si possono manifestare nella struttura nel corso di eventi eccezionali.

Inoltre, per mezzo di alcuni programmi di calcolo, quali Straus7, possiamo applicare un'analisi in presenza di non linearità meccanica e/o geometrica.

Il classico metodo di calcolo è definito alle "tensioni ammissibili", in cui le sollecitazioni indotte nei vari elementi della struttura sono messe a confronto con le tensioni consentite. Tenendo conto di una crisi puntuale, è in grado di controllare la sicurezza con un semplice legame fra le tensioni prodotte dai carichi esterni e le resistenze dei vari materiali. Inoltre, il metodo di calcolo tradizionale riconduce il collasso alla crisi puntuale di una sezione, mentre sono composte le varie sezioni dal comportamento duttile, per cui è la crisi di tutta la sezione a portare il collasso, nonché strutture iperstatiche, per cui il collasso è dato dalla formazione di un alto numero di cerniere plastiche, capaci di rendere la struttura labile.

Per far fronte alla lacuna del metodo di calcolo alle tensioni ammissibili, si applica quello agli stati limite, dove la particolarità di sollecitazione interna, causata dal massimo valore di carico previsto, è messa a confronto con la minima resistenza prevista dalla sezione, ponderando adeguatamente i coefficienti di sicurezza in base alla tipologia di stato limite considerato dalla verifica.

8 PROPRIETÀ MECCANICHE DELL'ACCIAIO IN CASO DI ACCIAIO

I materiali usati per realizzare gli elementi strutturali si rappresentano con i valori di progetto del modulo elastico e della resistenza. Solitamente, la resistenza, nel metodo agli stadi limite, è data dalla tensione di rottura del materiale all'applicazione di carichi con durata abbastanza breve. Per quanto riguarda il modulo elastico, si utilizzano due valori: un valore medio per definire le deformazioni ed uno caratteristico per fissare la stabilità dell'equilibrio.

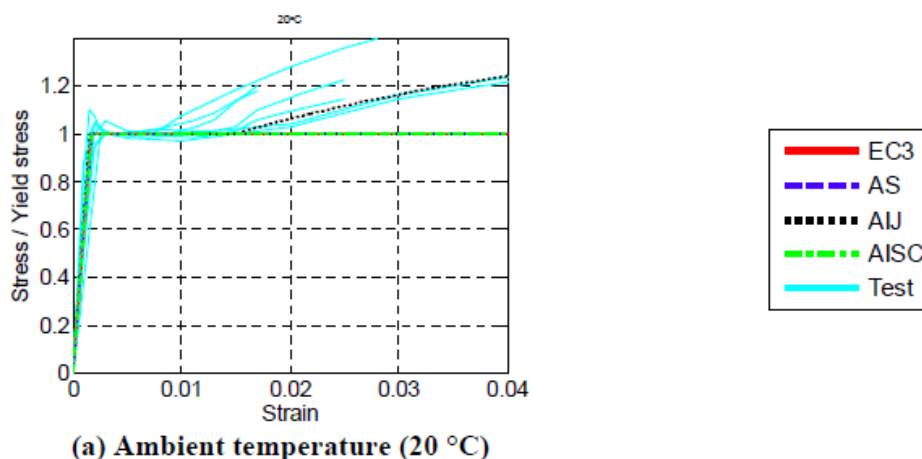
Inoltre, alcune informazioni sulle proprietà dell'acciaio delle saldature e dei bulloni si ritrovano nella EN 1993-1-2.

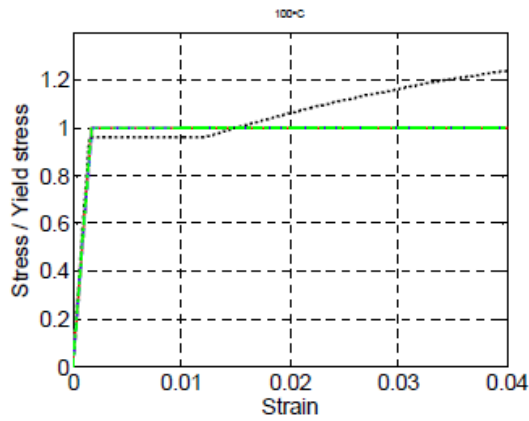
8.1 PROPRIETÀ DEGLI ACCIAI

Nel 2007 Gregory G. Deierlein e Jiro Takaji dell'Università di Stanford sono giunti a trarre importanti conclusioni, per mezzo di una serie di confronti di prove su larga scala della tensione transitoria appartenente agli acciai.

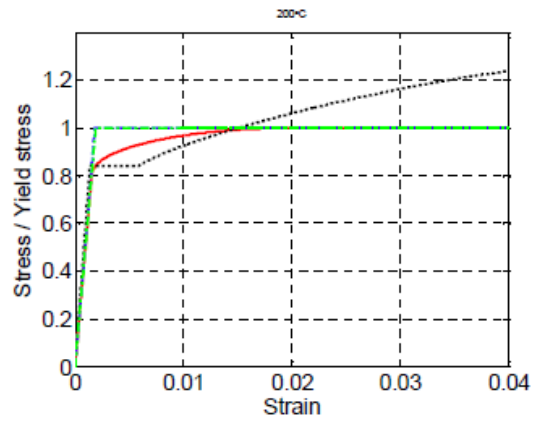
Per utilizzare i dati sperimentali ottenuti dai test che hanno avuto luogo in Australia, USA, Regno Unito, Canada e Giappone, sono state realizzate delle analisi numeriche, in modo da localizzare una relazione che sia in grado di identificare al meglio il legame alle temperature elevate.

Sono qui riportati le difformità fra i risultati normalizzati ricavati dai test con le varie approssimazioni analitiche in relazione alle temperature.

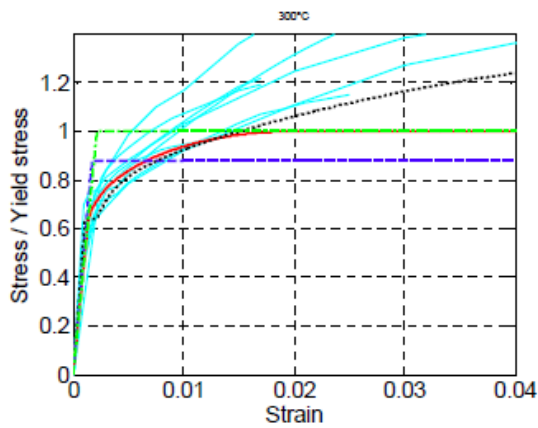




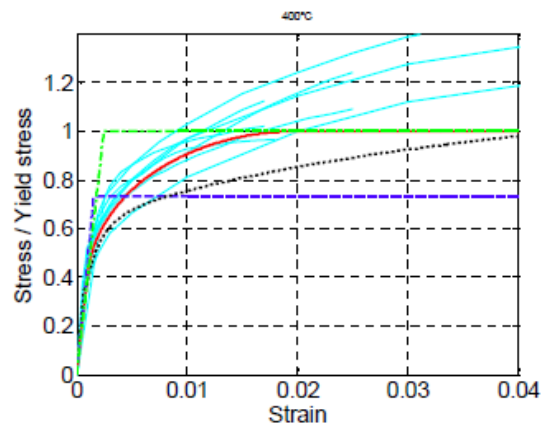
(b) 100 °C



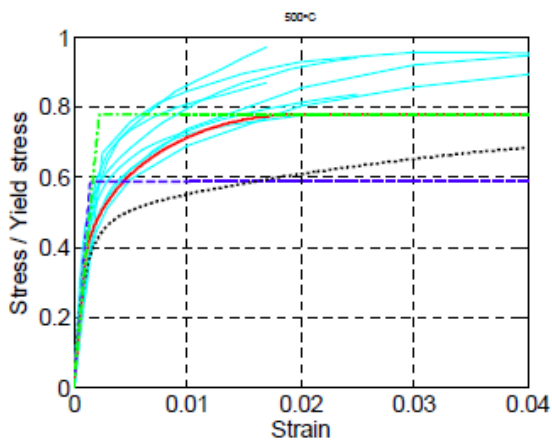
(c) 200 °C



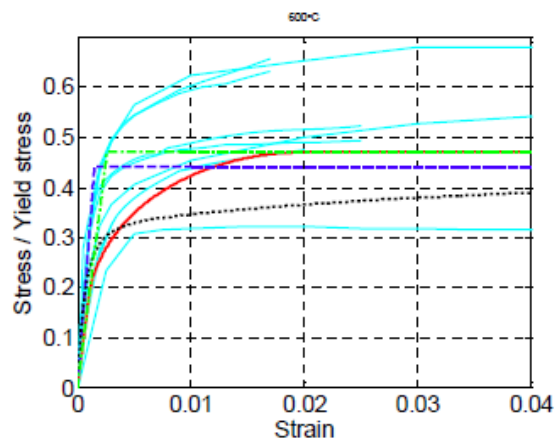
(d) 300 °C



(e) 400 °C



(f) 500 °C



(g) 600 °C

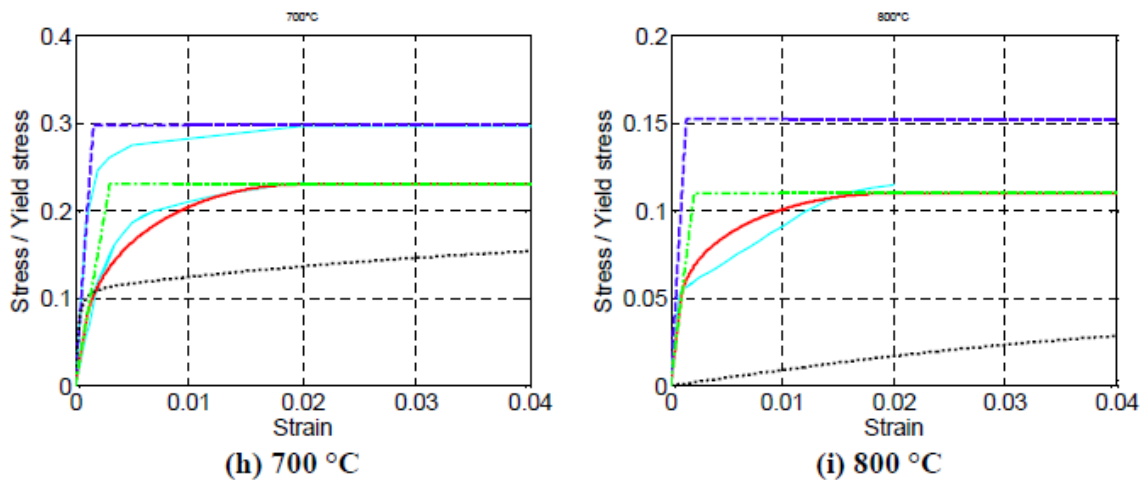


Figura 8.1-Curve sforzo deformazione al variare della temperatura per i diversi studi condotti

I test evidenziano come per temperature inferiori ai 400°C non si registra alcun cambiamento considerevole per le strutture in acciaio durante un incendio, dal momento che il decadimento della resistenza rimane esiguo per queste temperature, riducendosi in modo costante fino ad 800°C.

Confrontando i risultati dei test fra i 400°C e i 600°C con le equazioni, è evidenziabile come quest'ultime siano vicine o di poco inferiori rispetto a quelle presentate dall'Eurocodice. Inoltre, possono essere considerate come la miglior rappresentazione delle caratteristiche degli acciai reali sottoposti ad alte temperature.

I risultati a cui è giunta la British Steel negli anni '80 sono quelli su cui si fonda l'Eurocodice, che li utilizza per ricavare i fattori di riduzione per:

- Il limite di proporzionalità;
- La pendenza del ramo lineare elastico;
- La resistenza di snervamento effettiva.

Ora viene riportato il grafico e la tabella presenti nell'EC3:

Temperatura dell'acciaio θ_a	Fattori di riduzione alla temperatura θ_a relativi ai valori di f_y o E_a a 20 °C		
	Fattore di riduzione (relativo a f_y) per la resistenza di snervamento effettiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Fattore di riduzione (relativo a f_y) per il limite di proporzionalità $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Fattore di riduzione (relativo a E_a) per la pendenza del ramo lineare elastico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
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
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

Nota Per valori intermedi della temperatura dell'acciaio è consentita l'interpolazione lineare.

Figura 8.2-Fattori di riduzione

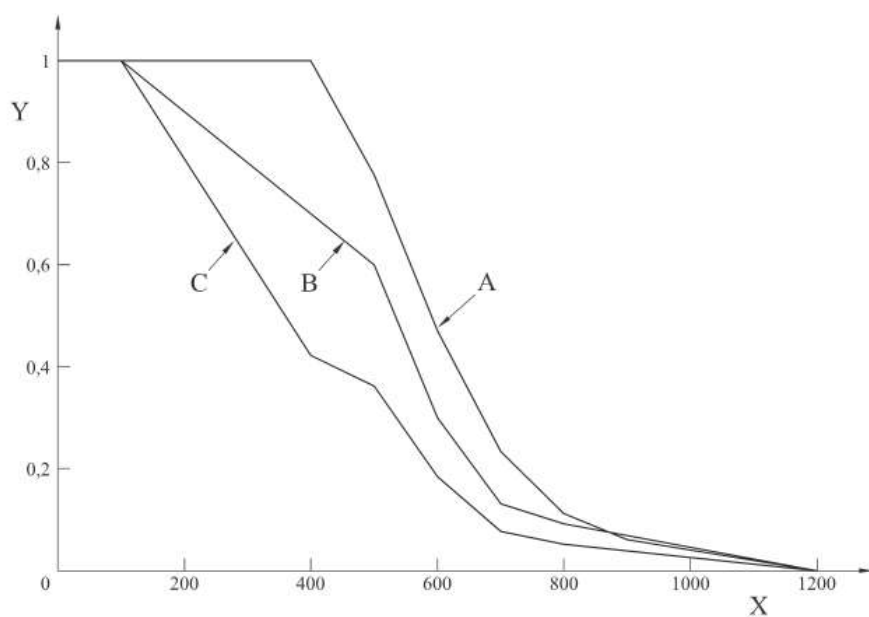


Figura 8.3-Curve di riduzione proposte dagli Eurocodici

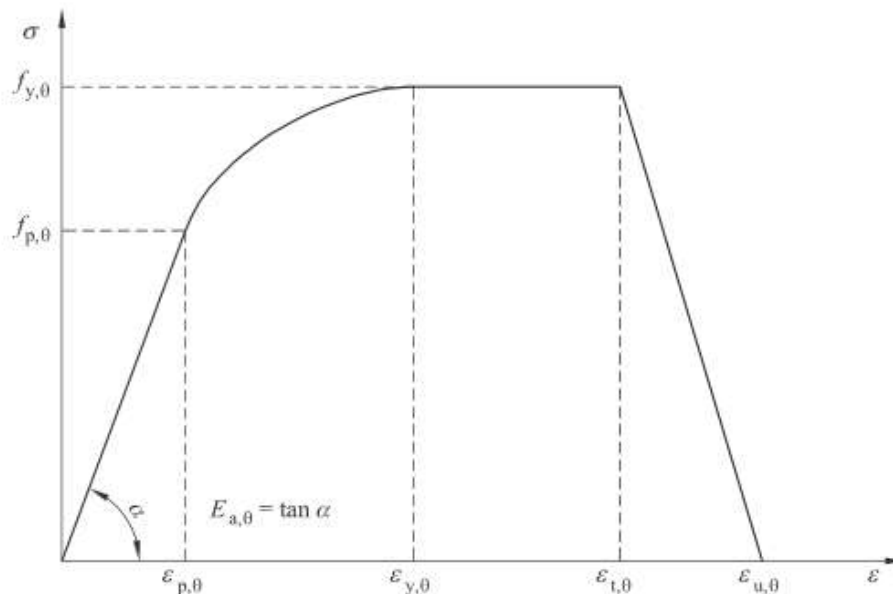


Figura 8.4-Curva sforzo deformazione proposta dall'Eurocodice

La parte iniziale della curva evidenzia un andamento di tipo lineare fino a giungere al limite di proporzionalità $f_{p,\theta}$ e mostra come il modulo elastico $E_{a,\theta}$ sia corrispondente alla pendenza di tale segmento di linea retta. Subito dopo, si può osservare come la seconda parte della curva rappresenti la transizione dal campo elastico al plastico, evidenziando un andamento di tipo ellittico fino al limite di resistenza effettivo $f_{y,\theta}$. Si tratta di una porzione retta della curva, tale fino al limite della deformazione. Infine, si ha un ultimo tratto con andamento lineare discendente fino allo sforzo nullo nel momento dell'ultima deformazione.

Mettendo a confronto i vari attori di riduzioni in relazioni alle alte temperature, si osserva come la rigidezza diminuisca velocemente rispetto alla sua resistenza, implicando una variazione delle modalità del collasso degli elementi in acciaio. Se si considera una trave in acciaio, ad esempio, avente una sezione sottile a I, progettata per ottenere un collasso da cerniera plastica con il carico ultimo a temperatura ordinaria, può entrare in crisi precocemente a causa dell'imbozzamento dell'anima quando sottoposto ad alte temperature.

Nell'appendice A dell'EC3 si espone una rappresentazione aggiuntiva della curva sforzo-deformazione, per cui si presenta un incurvamento per temperature minori ai 400°C, dunque una ripresa di resistenza, dal momento che i coefficienti $K_{y,\theta}$ sono uguali a 1.25 fino ai 400°C. Quest'ultima è applicata se e solo se un'instabilità dell'elemento, oppure una locale, non induca ad un collasso precoce.

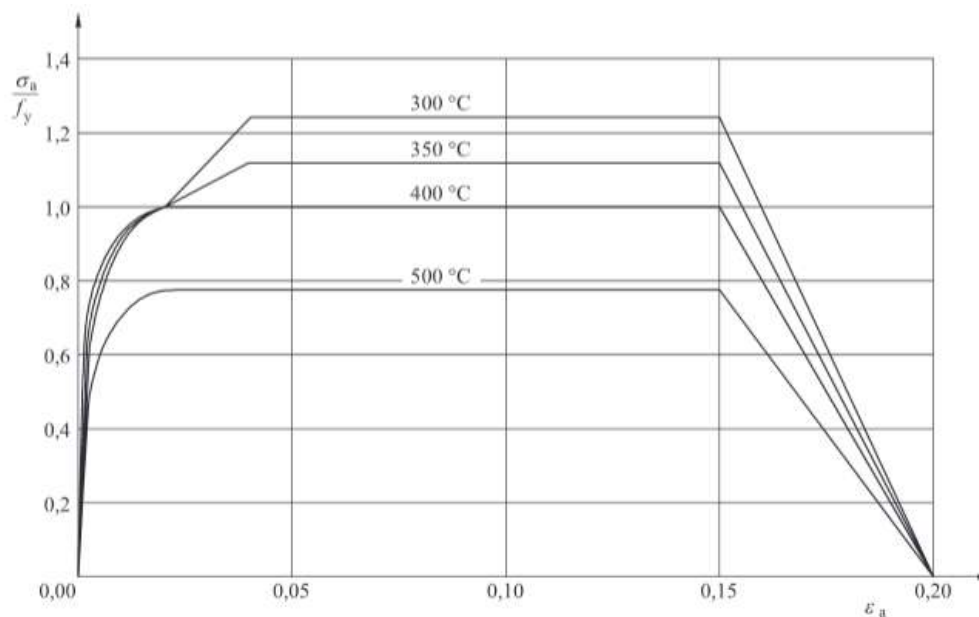


Figura 8.5-Curva sforzo deformazione con incrudimento

8.2 BULLONI E SALDATURE

Nella appendice D presente nella EN 1993-1-2 sono forniti dati utili sulla progettazione antincendio di bulloni e saldature, considerando anche le proprietà meccaniche alle diverse temperature rispetto a quelle delle travi collegate.

La EN 1993-1-2 afferma, per quanto riguarda i collegamenti bullonati, che non è strettamente indispensabile tener conto del collasso della sezione netta in corrispondenza dei fori se presente un dispositivo di giunzione in ciascuno di essi, dal momento che si suppone che la temperatura dell'acciaio nei collegamenti risulti inferiore conseguentemente alla presenza di materiale supplementare. L'Eurocodice, basandosi su una serie di prove, assegna lo stesso fattore di riduzione $k_{b,\theta}$ ai bulloni sottoposti a trazione e a taglio, non considerando la tipologia di bullone. Per quanto riguarda i bulloni ad attrito, si presume che siano soggetti a scorrimento durante l'incendio e che la resistenza di ogni bullone debba essere fissata esattamente come nel caso dei bulloni portanti.

La resistenza al fuoco dei bulloni si determina nei seguenti modi:

- Resistenza a trazione;

$$F_{ten,t,Rd} = F_{t,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

- Resistenza portante;

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

- Resistenza al taglio;

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- $k_{b,\theta}$ è il fattore di riduzione per la temperatura del bullone;
- $F_{t,Rd}$ è il valore di progetto della resistenza a trazione, secondo la EN 1993-1-8;
- $F_{v,Rd}$ è il valore di progetto della resistenza a taglio del bullone secondo la EN 1993-1-8;
- $F_{b,Rd}$ è il valore di progetto della resistenza portante, secondo EN 1993-1-8;
- $\gamma_{M,fi}$ è il coefficiente di sicurezza parziale in condizioni d'incendio;
- γ_{M2} è il coefficiente di sicurezza parziale a temperatura ambiente.

Temperatura θ (°C)	Bulloni a taglio e trazione $k_{b,q}$	Saldature d'angolo kw,q	Saldature di testa kw,q
20	1	1	1
100	0.968	1	1
200	0.935	1	1
300	0.903	1	1
400	0.775	0.876	1
500	0.550	0.627	0.780
600	0.220	0.379	0.470
700	0.100	0.130	0.230
800	0.067	0.074	0.074
900	0.033	0.018	0.018
1000	0	0	0.000

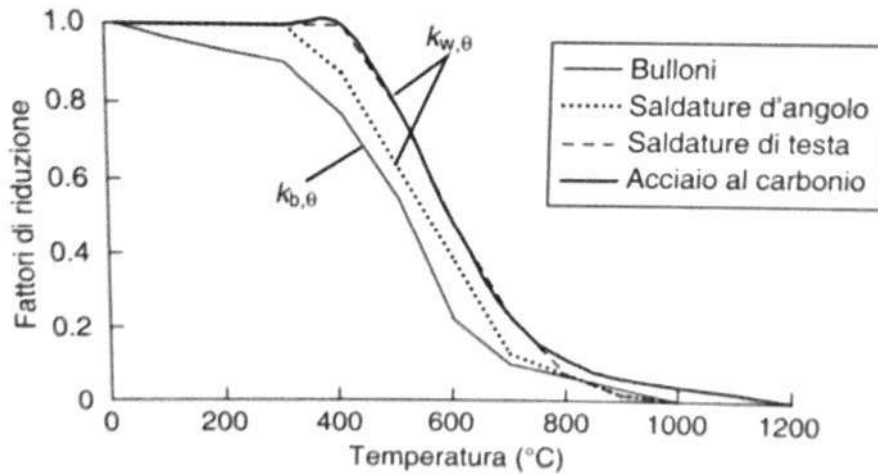


Figura 8.6-Fattori di riduzione per i collegamenti

Il valore di progetto della resistenza al fuoco per unità di lunghezza di una saldatura ad angolo si determina come:

$$F_{w,t,Rd} = F_{w,Rd} k_{w,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- $k_{w,\theta}$ indica il fattore di riduzione per la temperatura della saldatura;
- $F_{w,Rd}$ si riferisce al valore di progetto della resistenza della saldatura per unità di lunghezza, secondo EN 1993-1-8.

Si considerano le saldature a cordoni d'angolo come aventi una maggiore prestazione al fuoco raffrontata ai bulloni, ma possiedono un'inferiore conservazione della resistenza se paragonata al metallo base oppure alle saldature di testa.

9 VERIFICA DI MEMBRATURE SOGGETTE A CARICO DI INCENDIO

La verifica strutturale durante l'incendio può essere realizzata con riferimento alla temperatura, alla resistenza e al tempo. L'individuazione della tipologia di verifica è data dal risultato che si aspira ad ottenere e dalle ipotesi iniziali.

9.1 VERIFICA SEMPLIFICATA DI MEMBRATURE

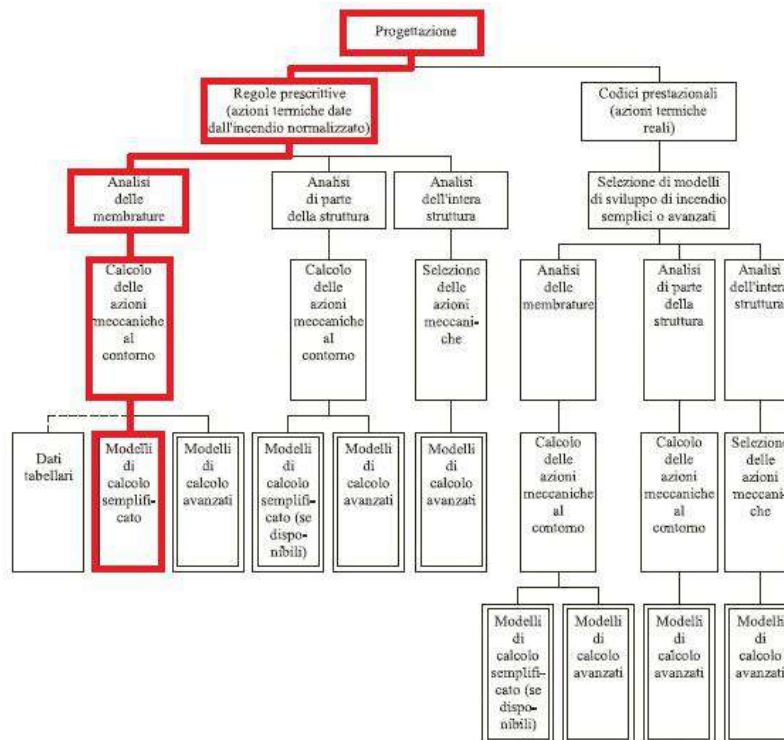


Figura 9.1-Metodo di progettazione

Molte analisi del tipo teorico e empirico sono state focalizzate sulla determinazione di una procedura di **valutazione semplificata**, dove la resistenza di progetto nell'eventualità di un **incendio normalizzato**, ovvero un incendio in cui la temperatura della sezione è fissata con l'uso delle curve di riscaldamento, già trattate nel precedente paragrafo sulla base di un determinato lasso di tempo, debba essere ottenuta attraverso procedure simili a quelle utilizzate ai fini della verifica della sicurezza a temperatura ambiente, considerando, però, una diminuzione delle proprietà meccaniche nell'acciaio, in relazione ai fattori correttivi e alla temperatura: questa è la base generale a cui si rifanno i metodi presentati dagli Eurocodici.

1. Classificazione delle sezioni

Conseguentemente alla duttilità dell'acciaio, le membrature presentano un'intrinseca capacità plastica, eppure le parti compresse delle sezioni rette, a causa delle sollecitazioni di pressoflessione, sono capaci di subire un'instabilità locale, prodotta da una snellezza elevata: questo evento si definisce *instabilità locale* e può avvenire dapprima del conseguimento del limite elastico della sezione. Gli Eurocodici, proprio come le NTC08, espongono quattro diverse classi di duttilità per non tralasciare l'instabilità locale:

- Classe 1, se la sezione può originare una cerniera plastica con capacità rotazionale, la quale è necessaria ai fini dell'analisi strutturale con metodo plastico, senza alcun tipo di decremento della resistenza;
- Classe 2, se la sezione può elaborare il proprio momento resistente plastico con una limitata capacità rotazionale, conseguentemente ai fenomeni d'instabilità locale;
- Classe 3, nel momento in cui nella sezione le tensioni calcolate nelle fibre estreme compresse sono in grado di conseguire la tensione di snervamento, tenendo conto che l'instabilità locale non permette lo sviluppo del momento resistente plastico;
- Classe 4, se l'instabilità locale in una o più zone della sezione è conseguito precedentemente rispetto allo snervamento di una qualsivoglia fibra.

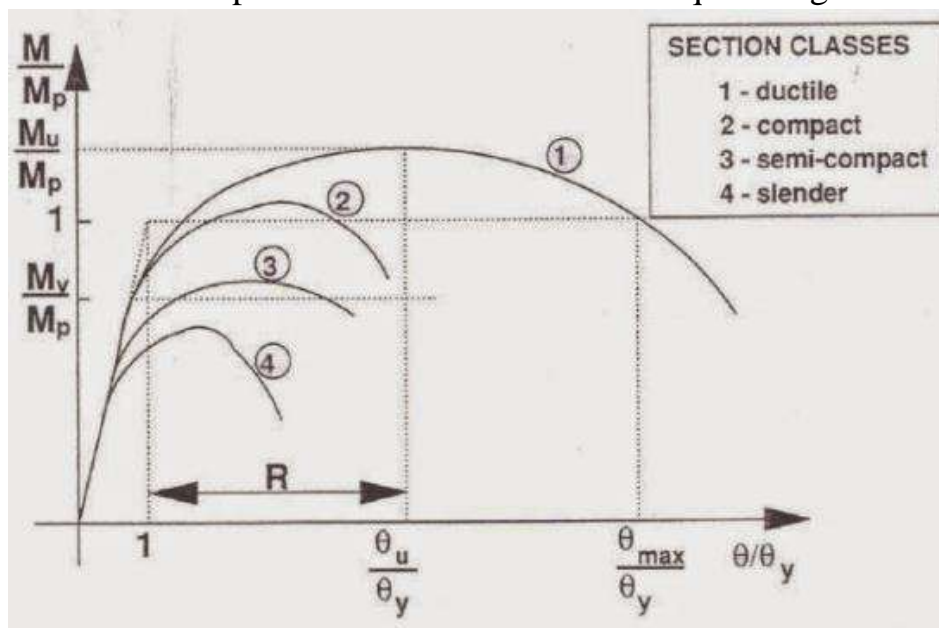


Figura 9.2-Classi delle sezioni

Per le prime due classi si può utilizzare il metodo plastico per valutare la capacità portante delle membrature e delle sezioni anche con una diversa duttilità disponibile, la quale influisce sull'entità della redistribuzione plastica delle sollecitazioni nelle strutture di tipo iperstatico.

Le caratteristiche geometriche e quelle meccaniche del materiale, ma anche la tipologia delle varie parti che compongono una sezione influenzano la classe di appartenenza di quest'ultima.

Sono qui riportate le tabelle per valutare la classe di duttilità delle parti compresse appartenenti ad una sezione, tenendo conto che la tipologia di acciaio applicato influenza il parametro ϵ , proprio come riporta la relazione:

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

Per la verifica di resistenza al fuoco si ha bisogno di considerare il modificarsi delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio sulla base della temperatura. Il decremento del modulo elastico dell'acciaio in relazione alla temperatura comporta una maggiore sensibilità, rispetto alle normali condizioni ambientali, all'instabilità locale da parte delle membrature metalliche durante l'incendio. Per tale motivo, la classificazione delle sezioni durante l'incendio è realizzata utilizzando un valore di ε inferiore a quello della temperatura ambiente, comportando dei valori più severi di snellezza:

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

Dove:

- f_y indica la resistenza allo snervamento ad una temperatura di 20°C.


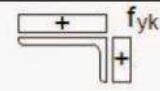

Il coefficiente 0.85 è un valore di $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{y,\theta}}$ approssimato, in cui $k_{e,\theta}$ e $k_{y,\theta}$ sono i fattori di riduzione inerenti alla resistenza di snervamento reale dell'acciaio ad una temperatura Θ e al modulo di elasticità.

Dal momento che nel mezzo dell'incendio si verifica una variazione della distribuzione delle tensioni e delle sollecitazioni all'interno della sezione, si dovrebbe classificare per ogni singolo tempo t di esposizione all'incendio, ma si può approvare anche un'approssimazione limitata e classificare l'elemento in base al ruolo che svolge, prediligendo delle ipotesi che siano in favore della sicurezza.

		Parti interne compresse				
		Inflessione intorno all'asse		Inflessione intorno all'asse		
Classe	Parte soggetta a flessione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a flessione e a compressione			
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 72\alpha$	$c/t \leq 33\epsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{39\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\alpha$	$c/t \leq 38\epsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{45\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 124\alpha$	$c/t \leq 42\epsilon$	quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\alpha(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ si applica se la tensione di compressione $\sigma \leq f_{yk}$ o la deformazione a trazione $\epsilon_y > f_{yk}/E$

		Piattabande esterne				
		Profilati laminati a caldo		Sezioni saldate		
Classe	Piattabande esterne soggette a compressione	Piattabande esterne soggette a flessione e a compressione		Con estremità in trazione		
		Con estremità in compressione		Con estremità in trazione		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Per k_σ vedere EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Angolari						
						
Riferirsi anche alle piattabande esterne (v. Tab 4.2.II) Non si applica agli angoli in contatto continuo con altri componenti						
Classe	Sezione in compressione					
Distribuzione delle tensioni sulla sezione (compressione positiva)						
3	$h/t \leq 15\epsilon$ $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
Sezioni Tubolari						
						
Classe	Sezione inflessa e/o compressa					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$ (Per $d/t > 90\epsilon^2$ vedere EN 1993-1-6)					
$\epsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

2. Elementi tesi

La EN 1993-1-2 riporta due metodologie per valutare la resistenza al fuoco dei componenti in acciaio tesi:

- Il metodo delle resistenze di progetto, ovvero il calcolo della resistenza di progetto di un componente, fondata sull'area della sezione, sulle proprietà del materiale, che si riducono dinanzi alle alte temperature, e la distribuzione della temperatura sulla sezione;
- Il metodo della temperatura critica, ovvero il calcolo della temperatura per cui il componente collasserà, tenendo presente un preciso livello di utilizzo e una distribuzione della temperatura uniforme.

La EN 1993-1-2 riporta, per quanto riguarda il metodo della resistenza di progetto, ben due modi per il calcolo della resistenza di progetto appartenente ad un elemento teso alle alte temperature: uno può essere applicato per un elemento teso con una distribuzione della temperatura che non risulta uniforme all'interno della sezione trasversale, l'altro si può utilizzare per un elemento teso che presenta una distribuzione di tipo uniforme della temperatura nella sezione.

La resistenza di progetto di un elemento teso, avente una distribuzione irregolare della temperatura all'interno della propria sezione, può considerarsi equivalente rispetto alla resistenza di progetto di un elemento avente una distribuzione uniforme della temperatura, ammettendo che la temperatura uniforme utilizzata sia uguale a quella massima registrata nella sezione avente una distribuzione irregolare.

- **Distribuzione non uniforme di temperatura**

La EN 1993-1-2 riporta la resistenza di progetto $N_{fi,t,Rd}$ al tempo t appartenente ad un componente teso con una distribuzione irregolare della temperatura nella sua sezione trasversale:

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

In cui:

- f_y è la tensione di snervamento;
- $\gamma_{M,fi}$ è il coefficiente parziale di sicurezza per le proprietà del materiale in caso di incendio;
- $k_{y,\theta,i}$ è il fattore di riduzione per la resistenza di snervamento dell'acciaio a temperatura Θ_i ;
- Θ_i è la temperatura nell'area elementare A_i ;
- A_i è un'area elementare della sezione alla temperatura Θ_i .

Attraverso questa metodica, la sezione trasversale risulta suddivisa in una serie di elementi separati, determinando per ognuno:

1. Il fattore di riduzione;
2. La tensione di snervamento
3. La temperatura;
4. L'area.

L'equazione precedentemente riportata è applicata per le somme delle resistenze di ogni elemento per ricavare la resistenza totale di tutta la sezione trasversale.

Tutte le suddivisioni considerate idonee possono essere utilizzate, ma per una precisione nei calcoli la sezione dovrà essere ripartita in elementi con una distribuzione della temperatura pressoché uniforme. Se la distribuzione della temperatura risulta diversa nella superficie dell'elemento, allora si utilizza una maggior temperatura.

- **Distribuzione uniforme della temperatura**

La EN 1993-1-2 riporta la resistenza di progetto $N_{fi,t,Rd}$, in relazione al tempo t , di un componente teso avente una distribuzione uniforme della temperatura sulla sua sezione trasversale:

$$N_{fi,t,Rd} = k_{y\theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- N_{Rd} si riferisce al valore di progetto della resistenza della sezione trasversale lorda $N_{pl,Rd}$ per la temperatura ambiente, secondo quanto affermato dalla EN 1993-1-1;
- $k_{y,\theta}$, indica il fattore di riduzione per la resistenza di snervamento dell'acciaio ad una temperatura Θ_a .

Tale metodo si fonda sulla progettazione, riportata nella EN 1993-1-1, di elementi tesi ad una temperatura ordinaria, introducendone il fattore di riduzione $k_{y,\theta}$ al fine di prendere in considerazione la diminuzione delle proprietà dei materiali ad alte temperature. Si registra, comunque, una variazione fra tale approccio e quello, utilizzato per progettare a freddo, che concerne la prestazione della sezione netta appartenente al componente. Nel momento in cui si sviluppa un incendio, si presuppone che in un foro per il bullone, sempre che il bullone vi sia all'interno, la sezione intorno non inizi ad aumentare la temperatura come quella della parte rimanente del componente. Tale evento avviene in quanto la massa termica s'incrementa in maniera locale per la presenza del bullone. Ciò avrà come risultato un aumento della resistenza del componente all'interno della sua sezione netta, tanto da permettere l'applicazione delle caratteristiche della sezione lorda invece di quelle appartenenti a quella netta.

- **Metodo della temperatura critica**

Per quanto riguarda un componente teso in acciaio in relazione al tempo t , la temperatura critica, tenendo conto di una distribuzione omogenea della temperatura, è quella per cui la caratteristica resistente del componente diminuisce fino a conseguire il valore appartenente al carico applicato.

La EN 1993 definisce la temperatura critica nel modo seguente:

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

In cui:

- μ_0 , ovvero il livello di utilizzo del componente, si ottiene con:

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

In cui:

- $R_{fi,d,0}$ indica il valore di $R_{fi,d,t}$ al tempo $t=0$ e a temperatura ordinaria.

Il livello di utilizzo è il rapporto fra il carico applicato allo stato limite dell'incendio ($E_{fi,d}$) e la capacità resistente del componente in funzione del lasso temporale del fuoco $t=0$ ($R_{fi,d,0}$), equivalente alla capacità resistente a temperatura ordinaria per ciò che concerne gli elementi tesi. Questa è definita per mezzo dell'espresso presente all'interno della EN 1993-1-1.

Alternativamente, μ_0 può essere ricavata nel modo seguente per gli elementi tesi:

$$\mu_0 = \eta_{fi} \left[\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M,1}} \right]$$

In cui:

- η_{fi} indica il fattore di riduzione.

Una simile metodologia richiede che il componente venga realizzato alla sua piena resistenza a temperatura ordinaria: ciò permette di ricavare il fattore di utilizzo tramite il rapporto fra il carico utilizzato allo stato limite dell'incendio ed il carico ultimo di progetto ad una temperatura ordinaria. Nel momento in cui la struttura subisce una combinazione del proprio peso (G) e del carico variabile (Q), si può esprimere il fattore di utilizzo come:

$$\mu_0 = \frac{G + \psi Q}{1.35G + 1.5Q} \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M,1}} \right)$$

3. Elementi compressi

• Lunghezza di libera inflessione

Uno dei parametri più importanti per la determinazione della resistenza alla compressione è la lunghezza di libera inflessione propria della colonna. Quella che viene applicata per progettare allo stato limiti dell'incendio è diversa da quella usata nella progettazione ad una temperatura ordinaria.

Ciò accade nel momento in cui una colonna è sottoposta all'azione dell'incendio e risulta situata in un compartimento in grado di resistere al fuoco: inizia una diminuzione della rigidezza rotazionale della colonna, con la contemporanea invariabilità di quella appartenente alla struttura contigua non esposta alle fiamme. Gli Eurocodici prescrivono l'applicazione di una lunghezza libera, nell'eventualità dell'incendio, che sia inferiore a quella propria di un evento a temperatura ordinaria.

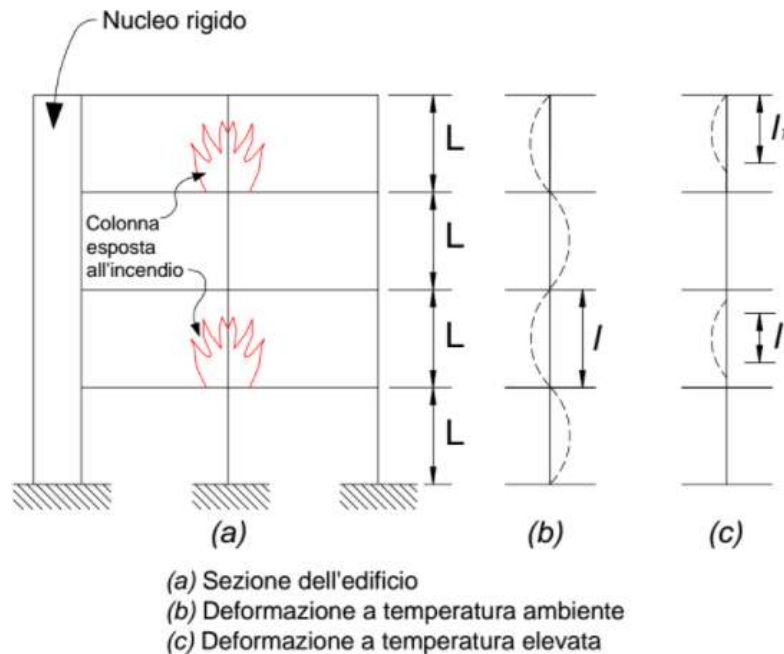


Figura 9.3-Lunghezza libera di inflessione

- **Sezioni di classe 1,2 e 3**

Si anticipa che, per quanto riguarda gli elementi aventi una sezione di classe 4, non è possibile un approccio nel dominio delle resistenze, ma si può attuare un approccio in quello delle temperature, tenendo conto di un dato valore critico conservativo. Inoltre, basta verificare che la temperatura dell'elemento, in relazione al lasso di tempo t necessario per la verifica, sia minore di 350°C .

Si può notare che tale valore equivale a quello presente nella circolare 91/61 per le prove su elementi inflessi e tesi. Per quanto riguarda gli elementi compressi, invece, tale temperatura si aggira attorno ai 300°C , senza alcun tipo di carico applicato.

Considerando, invece, gli elementi appartenenti alle prime tre classi, si realizza una verifica concettuale, come per il caso a freddo, ma con l'uso di parametri differenti per quello caldo. Le relazioni sotto riportate risultano essere valide per le uniformi distribuzioni della temperatura. Per quanto riguarda una distribuzione non regolare della temperatura, si applicano delle relazioni presupponendo una distribuzione

conservativa uniforme, avente un valore della temperatura equivalente a quello massimo è registrato nel tempo t della verifica.

La relazione di verifica a caldo, similmente a quanto prevede la verifica a freddo delle aste compresse, risulta:

$$N_{b,fi,\theta,R,d} = \chi_{fi} A \frac{k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{m,fi}}$$

La tabella che segue permette un confronto fra le verifiche di stabilità a caldo e a freddo per quanto concerne le aste compresse:

Parametri	Formulazione a freddo	Formulazione a caldo
χ, χ_{fi}	$\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}}$	$\frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 + \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$
Φ, Φ_{fi}	$0.5[1 + \eta + \bar{\lambda}^2]$	$0.5[1 + \eta_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2]$
η, η_{fi}	$\eta = \alpha(\bar{\lambda} - 0.2)$	$\eta = \alpha_{\theta} * \bar{\lambda}_{\theta}$
α, α_0	0.13 ÷ 0.76	$\alpha_{\theta} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
λ, λ_0	$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$	$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}} * \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$

Tabella 9.1 -Differenze tra le due formulazioni

Si osservi la computazione del valore a caldo di N_{cr} , uguale a:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{fi}^2}$$

In cui

- L_{fi} rappresenta la lunghezza libera di inflessioni a caldo

Considerando anche che:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = 1.2\bar{\lambda}$$

4. Elementi inflessi

Rassomiglianti ai calcoli a temperatura ordinaria forniti dalla EN 1993-1-1 risultano quelli per progettare le travi in acciaio allo stato limite dell'incendio. Secondo la EN 1993-1-2 occorre verificare tali travi in acciaio per quanto riguarda:

- Il limite di deformazione;
- La capacità del momento flettente;
- La resistenza alla instabilità latero – torsionale;
- La resistenza al taglio.

La verifica della resistenza, per quanto concerne le sezioni con una distribuzione uniforme della temperatura, è realizzata seguendo l'espressione:

$$M_{fi,\theta,R,d} = k_{y,\theta} \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} M_{r,d}$$

Dove:

$M_{r,d}$ si riferisce al momento plastico a freddo per le sezioni appartenenti alle prime due classi, al momento al limite elastico a freddo per ciò che concerne le sezioni appartenenti alla terza;

$k_{y,\theta}$ è il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento alla temperatura Θ .

Se la distribuzione della temperatura non risulta uniforme, è permesso, esclusivamente per le sezioni di classe uno e due, il presente modo per individuare il momento resistente:

$$M_{fi,t,R,d} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i}}{\gamma_{m,fi}}$$

Questa definizione è tratta dalla divisione in "n" aree A_i , aventi una tensione di snervamento $f_{y,i}$ e una distanza z_i dal proprio baricentro dall'asse plastico neutro.

In maniera diversa, è possibile applicare:

$$M_{fi,\theta,R,d} = k_{y,\theta_{max}} \frac{\gamma_{m,0} M_{r,d}}{\gamma_{m,fi} \kappa_1 \kappa_2}$$

Dove:

- $k_{y,\theta_{max}}$ indica il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento con riferimento alla massima temperatura registrata;
- $\kappa_1 \kappa_2$ si riferiscono ai due coefficienti che tengono conto della distribuzione non uniforme della temperatura, i cui valori sono presenti all'interno

dell'Eurocodice: il primo in relazione alla sezione trasversale, il secondo lungo lo sviluppo longitudinale dell'elemento.

Caso	κ_1	κ_2
Trave esposta su quattro lati all'incendio	1.0	-
Trave non protetta esposta all'incendio su 3 lati e con il quarto lato protetto da una soletta in cemento armato	0.70	-
Trave protetta esposta all'incendio su 3 lati e con il quarto lato protetto da una soletta in cemento armato	0.85	-
In corrispondenza della zona di vincolo di una trave continua	-	0.85
In tutti gli altri casi	-	1.00

Tabella 9.2-Valori di κ_1 e κ_2

Per verificare la stabilità di flessione torsionale per le travi aventi una qualsivoglia distribuzione della temperatura, rapportata al tempo t , si utilizza:

$$M_{b,fi,t,R,d} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta,com} \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}$$

In cui:

- $k_{y,\theta,com}$ si riferisce al coefficiente di riduzione della tensione di snervamento dell'acciaio relativo alla massima temperatura raggiunta nella flangia compressa (Θ_{com});
- W_y indica il modulo di resistenza plastico ($W_{pl,y}$) per le sezioni appartenenti alla classe uno oppure due, ma può anche indicare il modulo di resistenza elastico ($W_{el,y}$) relativamente alle sezioni appartenenti alla terza classe attorno all'asse forte y-y.

Esattamente come nel caso delle aste compresse, il fattore di riduzione del momento resistente, conseguentemente al fenomeno d'instabilità, presenta un'espressione raffrontabile:

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

$$\phi_{L,T,\theta,com} = 0.5[1 + \eta_{L,T,\theta,com} + \bar{\lambda}_{L,T,\theta,com}^2]$$

$$\eta_{L,T,\theta,com} = \alpha_\theta * \bar{\lambda}_{L,T,\theta,com}$$

$$\alpha_{\theta} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta com} = \bar{\lambda}_{LT} * \sqrt{\frac{k_{y\theta com}}{k_{E,\theta com}}}$$

Dove:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}$$

Per quanto riguarda una trave “a doppio T” doppiamente simmetrica, con una lunghezza libera dell’inflessione “L” e avente una distribuzione uniforme omogenea del momento flettente, il momento critico equivale a:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_{min} GI_p} \sqrt{\left[1 + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 GI_p} \right]}$$

In cui:

- I_{min} è il momento di inerzia nel piano di inflessione laterale;

$$I_w = \frac{h^2 I_{min}}{4}$$

- I_p indica il momento d’inerzia polare.

Per verificare a taglio con riferimento al periodo dell’esposizione t inerente alle sezioni appartenenti alle prime tre classi, si segue il seguente modo:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta web} \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} V_{t,d}$$

Dove:

- $V_{r,d}$ indica la resistenza a taglio a freddo della sezione;
- $k_{y,\theta,web}$ si riferisce al coefficiente di riduzione della tensione di snervamento dell’acciaio alla temperatura media registrata nell’anima (Θ_{web}).

5. Elementi pressoinflessi

Per quanto riguarda le membrature pressoinflesse durante l'incendio, le verifiche effettuabile sono analoghe a quelle in condizioni ambientali. Le formule di interazione sotto riportate per verificare la stabilità a pressoflessione risultano idonee nelle condizioni evento incendiario, presumendo che queste subiscano una distribuzione della temperatura di tipo uniforme:

$$\frac{N_{fi,e,d}}{N_{b,fi,min,\theta}} + k_y \frac{M_{y,fi,E,d}}{M_{res,fi,y,\theta}} + k_z \frac{M_{z,fi,E,d}}{M_{res,fi,z,\theta}} \leq 1$$
$$\frac{N_{fi,e,d}}{N_{b,fi,z,\theta}} + k_{LT} \frac{M_{y,fi,E,d}}{\chi_{LT,fi} M_{res,fi,y,\theta}} + k_z \frac{M_{z,fi,E,d}}{M_{res,fi,z,\theta}} \leq 1$$

Dove:

- $N_{b,fi,min}$ si riferisce allo sforzo normale resistente minimo per instabilità piana di progetto per asta piana compressa;
- $N_{fi,e,d}$ indicalo sforzo normale di progetto;
- $M_{y,fi,e,d}$ è il massimo momento flettente di progetto relativo all'asse y
- Y indica l'asse forte della sezione;
- z si riferisce all'asse debole della sezione;
- $M_{z,fi,e,d}$ indica il massimo momento flettente di progetto relativo all'asse z.

$$N_b = \chi_{fi} A \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}$$

In cui:

- $\chi_{LT,fi}$ indica il coefficiente di riduzione del momento resistente conseguente all'instabilità flesso-torsionale con riferimento all'asse y-y. Si pone uguale a 1,0 nel caso in cui l'asta non dovesse essere sensibile al fenomeno dell'instabilità flesso-torsionale;
- $M_{res,fi,y}$ indica il massimo momento flettente esplicabile dalla sezione attorno all'asse y-y;
- κ si riferisce al coefficiente di interazione, il quale considera le condizioni reali di forma e vincolo delle aste;
- χ_{fi} è il coefficiente di riduzione dello sforzo normale resistente conseguente all'instabilità piana dell'asta, la quale deve essere valutata rispetto all'asse y-y e a quello z-z.

6. Verifica di deformazione

Verificare la deformazione risulta fondamentale quando.

- Sono presenti delle inflessioni ragguardevoli della trave, in grado di apportare importanti deformazioni del materiale di protezione contro il fuoco, così da renderlo fragile e da provocare la separazione dalla trave in acciaio;
- È presente un'importante deformazione della trave, capace di apportare varchi negli elementi di separazione localizzati al di sotto della stessa trave, provocando la crisi della tenuta del compartimento.

Probabilmente, i limiti di deformazione della trave per i casi appena analizzati non sono uguali. Se si progettano le prestazioni del materiale atto a difendere dal fuoco, il limite di deformazione sarà uguale alla deformazione massima dell'acciaio, che farà diventare inutile alla sua funzione questo materiale. Solitamente i materiali di difesa dal fuoco più usati sono capaci di avere un adattamento alla deformazione dell'acciaio, ma, nel caso in cui il materiale applicato non possieda questa proprietà, a causa di elevata rigidità, la resistenza di progetto dell'acciaio dovrà essere diminuita a quella che corrisponde al massimo valore di deformazione del materiale.

Non è mai stato preso in conto di quanto una trave in acciaio sia in grado di subire una deformazione senza apportare danno alla tenuta al fuoco del compartimento, tuttavia, grazie ai miglioramenti dell'ingegneria strutturale antincendio, dove le deformazioni strutturali, conseguenti allo sviluppo di un incendio, sono capaci di registrare valori molto alti senza portare al collasso della struttura, potrebbe essere non idonea, oltre che avere una necessità di verifica esplicita delle deformazioni subite dalla struttura. Per fare ciò, occorre utilizzare metodologie di calcolo avanzati, poiché quelli semplificati non sono in grado di provvedere ad un simile obiettivo.

In questo elaborato, si considereranno i limiti convenzionali del progettare a caldo con valori di δ uguali a $1/30$ della luce L .

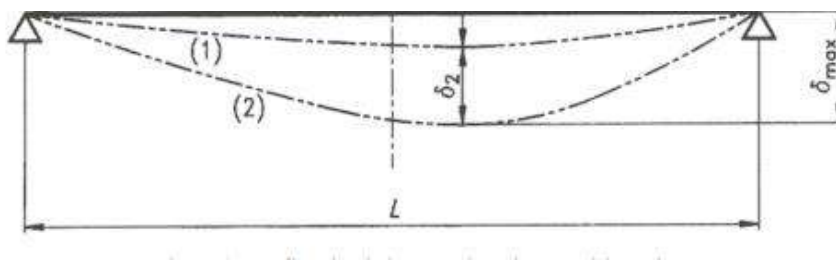


Figura 9.4-Freccia massima

7. Connessioni

Solitamente, sono i giunti standard, aventi dimensioni standard dei bulloni e spessori dei piatti, ad essere utilizzati per creare le connessioni delle strutture realizzate in acciaio, rendendo più semplice la fabbricazione e la progettazione.

I giunti si classificano come incastro oppure cerniera in base alla loro proprietà di spostare alle colonne i momenti delle travi caricate. Tuttavia, ogni giunto è schematizzabile come semi-rigido, ovvero possiedono un dato livello di capacità rotazionale e un determinato livello d'incastro. Una caratteristica importante del comportamento durante l'incendio è che il giunto è ipotizzato di semplice appoggio nelle condizioni ordinarie, ma effettivamente si comportano in maniera semi-rigida dinanzi all'incendio.

Il classico approccio per effettuare una progettazione al fuoco per quanto riguarda il giunto cerca di assicurare che quest'ultimo dimostri un'adeguata protezione di tipo passivo all'incendio, ovvero che presenti un uguale spessore delle colonne e delle travi, ma il giunto può dimostrare un grado di carico, dal momento che questo è relazionato con la resistenza al fuoco, maggiore di quello di queste parti collegate, inducendo l'applicazione su di esso di una insufficiente protezione di tipo passivo.

Il giunto potrebbe presentare anche una duttilità non idonea a resistere ad importanti deformazioni e alle rotazioni caratteristiche dello stato limite d'incendio. Particolarmente importanti sono:

- Le conseguenze della dilatazione termica incapace di creare rilevanti sforzi di compressione;
- La capacità rotazionale appartenente al giunto;
- La resistenza alla trazione del giunto nel raffreddamento.

La EN 1993-1-2 riporta due metodologie nella parte riguardante la progettazione di strutture in acciaio: una è quella semplificata, per cui la resistenza contro il fuoco di un giunto saldato oppure bullonato, è da considerare idonea ad una condizione che soddisfi:

- Il livello di utilizzo del giunto è minore a quello massimo dell'utilizzo di ogni elemento collegato;
- La resistenza termica $(d_f/l_f)_c$ riguardante la protezione contro il fuoco del giunto deve essere maggiore rispetto al valore minimo della resistenza termica $(d_f/l_f)_m$ della protezione dall'incendio applicata ai singoli elementi collegati;
- La resistenza del giunto ad una temperatura ordinaria soddisfa le normative quanto affermato dalla EN 1993-1-8.

Con livello di utilizzo si indica il rapporto fra il carico utilizzato allo stato limite dell'incendio ed il carico utilizzata ad una temperatura ordinaria in funzione del coefficiente parziale per lo stato limite dell'incendio:

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}}$$

In cui:

- N_{Rd} indica la resistenza di progetto ad una temperatura ordinaria;
- $N_{Ed,fi}$ si riferisce all'azione assiale di progetto in condizioni d'incendio.

Oltretutto, l'appendice D riferisce un ulteriore metodo per il calcolo della distribuzione della temperatura del giunto: dopo aver ricavato la distribuzione della temperatura, si calcolano la resistenza alla trazione, al taglio e la portata attraverso dei fattori di riduzione che implicano le conseguenze delle alte temperature.

Per ciò che concerne le travi alte perlomeno 400mm, la temperatura al fuoco del giunto si ricava con:

$$\theta_h = 0.88\theta_0[1 - 0.3(\frac{h}{D})]$$

In cui:

- D indica l'altezza della trave (mm);
- θ_0 è la temperatura, lontana dal giunto e misurata in gradi centigradi, della flangia inferiore della trave in acciaio;
- θ_h indica la temperatura, espressa in centigradi e ad altezza h (mm), della trave in acciaio;
- h si riferisce all'altezza dell'elemento, considerata partendo dalla parte inferiore della trave (mm).

Se si considera una trave è più alta di 400mm:

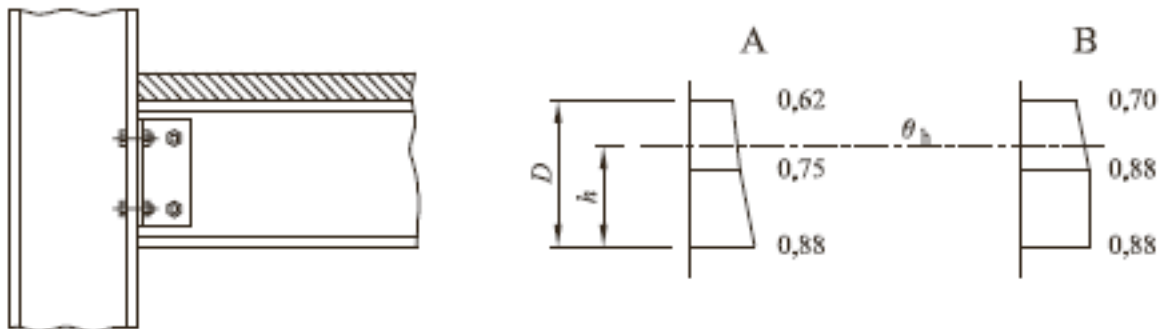
- $h > D/2$

$$\theta_h = 0.88\theta_0[1 - 0.2(1 - 2\frac{h}{D})]$$

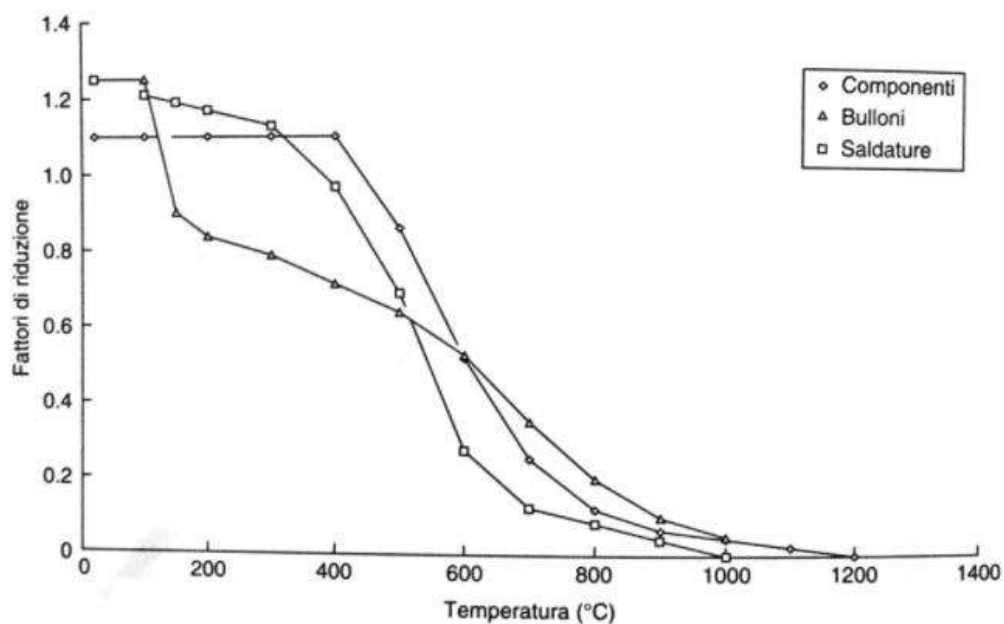
- $h < D/2$

$$\theta_h = 0.88\theta_0$$

- A Profilo di temperatura $D \leq 400$ mm
- B Profilo di temperatura $D > 400$ mm



I metodi di progettazione implicano che i comportamenti degli elementi di supporto e del giunto possedano un uguale tasso di diminuzione della resistenza, ma ciò non è sempre vero, come si evidenzia nella figura che pone a confronto i fattori di riduzione della resistenza per quanto riguarda i bulloni, le saldature e gli elementi.



La figura mostra che, fra i 350°C e i 1000°C, la resistenza della saldatura diminuisce in maniera più veloce di quella del componente collegato. Ugualmente, fra i 100°C e i 600°C, la resistenza dei bulloni diminuisce più velocemente di quella del componente collegato.

Dalla figura si può notare che tra i 350°C e 1000°C la resistenza della saldatura si riduce più rapidamente di quella del componente collegato. Allo stesso modo, tra 100°C e 600°C la resistenza dei bulloni si riduce più rapidamente di quella del componente collegato. Basandosi sui dati fruibili, in presenza di un livellamento della

protezione antincendio, un collegamento dimostrerà un decremento di resistenza superiore a quello degli elementi collegati

Il profilo della temperatura nel collegamento, comunque, non è equivalente a quello del componente collegato. La rapidità dell'aumento delle temperature diviene minore, conseguentemente a quanto procurato dalla schermatura da parte dei componenti collegati e dalla combinazione della più grande massa termica nel punto di giunzione. Da ciò si evidenzia come gli svantaggi connessi all'abbassamento della resistenza delle saldature e dei bulloni sono equilibrati dai vantaggi legati ad una diminuzione del gradiente termico lungo il collegamento. Perciò, le normative semplificate presenti nell'Eurocodice non dimostrano un abbassamento del grado di sicurezza esistente.

Per quanto riguarda le connessioni bullonate, l'annesso D dell'EN 1993-1-2 consiglia di evitare la verifica della sezione netta in corrispondenza delle fessure, sempre che vi sia un bullone per ciascun foro, poiché la temperatura dell'acciaio nei pressi della connessione è minore di quella della zona centrale della trave per merito del materiale aggiuntivo, come le squadrette di collegamento.

La resistenza a taglio della connessione durante l'incendio è definita come:

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- $\gamma_{M,fi}$ è il coefficiente parziale di sicurezza in condizioni di incendio
- $k_{b,\theta}$ indica il fattore di riduzione fornito dalla tabella dei coefficienti riduttivi esposta in precedenza;
- $F_{v,Rd}$ indica la resistenza a taglio di progetto del bullone, fissata assumendo la sezione filettata come sezione resistente;
- γ_{M2} si riferisce al coefficiente parziale di sicurezza a temperatura ordinaria.

La resistenza di progetto a rifollamento dei bulloni durante l'incendio è definita come:

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- $k_{b,\theta}$ indica il fattore di riduzione fornito in precedenza;
- $F_{b,Rd}$ si riferisce alla resistenza a rifollamento in condizioni ordinarie.

Per quanto riguarda le connessioni saldate a completa penetrazione, se la temperatura:

- È minore di 700 °C, la resistenza della connessione si assume equivalente a quella della parte collegata più fragile, utilizzando degli idonei fattori di riduzione;
- È superiore ai 700°C, il fattore di riduzione della resistenza è assunto equivalente a quello fornito per gli altri tipi di saldature.

Per ciò che concerne gli altri tipi di saldature, la resistenza di progetto per unità di lunghezza della saldatura durante l'incendio è definita come:

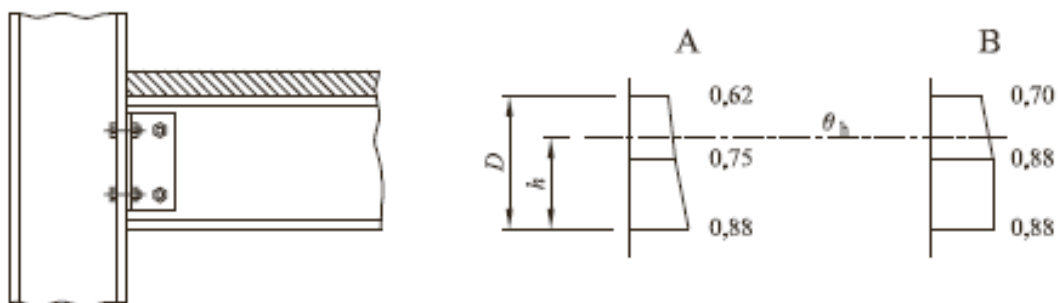
$$F_{w,t,Rd} = F_{w,Rd} k_{w,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

In cui:

- $k_{w,\theta}$ indica il fattore di riduzione dato in precedenza;
- $F_{w,Rd}$ si riferisce alla resistenza della saldatura nelle condizioni ordinarie.

In relazione alla schematizzazione esposta nel paragrafo D.1 dell'EN 1993-1-2, oltre che in precedenza, si può valutare la temperatura della connessione in modo semplificato.

- A Profilo di temperatura $D \leq 400$ mm
- B Profilo di temperatura $D > 400$ mm



10 MECCANISMI DI MEMBRATURE SOGGETTE A CARICO DI INCENDIO

Nel seguente paragrafo si espongono delle considerazioni sul comportamento della membratura in condizioni d'incendio, oltre che sul loro comportamento plastico delle stesse.

Negli esempi, si considerano gli elementi che si trovano all'interno della struttura da prendere in esame nella sua totalità, applicando dei metodi avanzati.

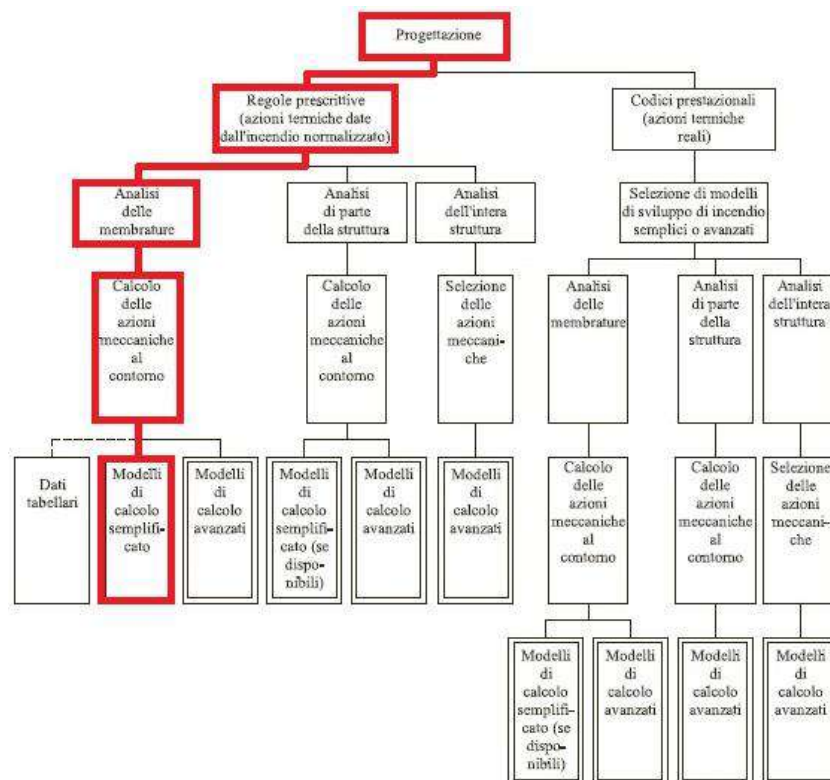


Figura 10.1- Procedura progettuale

10.1 EFFETTI DELL'INCENDIO SULLE MEMBRATURE

Per determinare dei fenomeni fondamentali, che si possono osservare su di una struttura durante l'incendio, si sono fissati dei principi molto importanti per comprendere le complesse interazioni fra i vari meccanismi strutturali che avvengono. Tali fondamenti sono utili per analizzare ed interpretare i risultati che si possono ottenere per mezzo dei metodi di analisi più sofisticati e sviluppati.

La principale relazione, che determina il comportamento delle strutture che subiscono effetti termici, è:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{thermal} + \varepsilon_{mechanical}$$

La deformata strutturale ($\varepsilon_{total} \rightarrow \delta$) è influenzata dalle deformazioni nel loro complesso, per mezzo di relazioni di congruenza oppure cinematiche. Al contrario, lo stato tensionale nella struttura ($\varepsilon_{mechanical} \rightarrow \sigma$), sia esso plastico che elastico, è governato dalle deformazioni meccaniche. Nel momento in cui non vi è l'applicazione di carichi esterni e non vi è la presenza di vincoli capaci di limitare le deformazioni termiche, allora si verifica un annullamento delle deformazioni meccaniche ($\varepsilon_{mechanical} = 0$), dunque:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{thermal} \rightarrow \delta$$

Nel momento in cui, invece, i vincoli presenti non permettono alle deformazioni termiche uno sviluppo in mancanza di carichi esterni, le deformazioni totali sono pari a zero ($\varepsilon_{total} = 0$), perciò:

$$\varepsilon_{thermal} + \varepsilon_{mechanical} = 0$$

In aggiunta al decadimento termico di cui sono vittima i materiali, un altro fattore estremamente importante, determinante per la reale risposta di una struttura durante l'incendio, è il modo con cui la struttura fa fronte alle deformazioni termiche, conseguenti all'aumento delle temperature all'interno dei suoi elementi. Quando la struttura non possiede vincoli d'estremità per opporsi alle deformazioni di tipo termico, la risposta sarà fissata dagli spostamenti, al contrario si avranno dei rilevanti stati tensionali. Considerando una trave esposta ad un incendio dal basso, ad esempio, essa aumenta la propria temperatura, presentando un dato gradiente di temperatura sulla sezione retta, il quale può approssimarsi per semplicità attraverso una legge lineare e dividersi in una distribuzione costante delle temperature sulla totalità della sezione e in una distribuzione di tipo bi-triangolare. La prima crea nell'elemento strutturale, considerato di materiale omogeneo, in mancanza di vincoli alla traslazione, delle dilatazioni termiche di tipo uniforme, senza che si effettui alcuna modifica dello stato delle sollecitazioni, il cui collasso è dato dal decadimento termo-meccanico dei materiali.

Per quanto riguarda i vincoli traslazionali, essi portano all'insorgere di alcune deformazioni meccaniche uguali ed opposte rispetto a quelle termiche: si creano degli importanti stati tensionali di compressione. La parte lineare, appartenente al diagramma della temperatura, crea una serie di curvature termiche nell'elemento e, dunque, un'inflexione, la quale, dinanzi a dei vincoli alla traslazione orizzontale e nel caso di rilevanti spostamenti, inducono ad un probabile "effetto catena", provocando uno stato tensionale di trazione. Se vi sono dei vincoli alla rotazione, le curvature termiche portano a dei momenti flettenti negativi all'interno dell'elemento.

Le risposte strutturali dipendono dallo schema statico e sono inerenti all'eventualità di presentare diversi scenari d'incendio che possono avvenire in una struttura. Un incendio del tipo "fast-burning", capace di raggiungere velocemente il flash over e di registrare le alte temperature per poi esaurirsi, comporta elevati gradienti termici (calcestruzzo a temperature relativamente basse ed acciaio molto caldo) e dei bassi valori medi delle temperature. Un incendio lento, invece, registra solo delle temperature abbastanza modeste, ma continua nella sua combustione per un lungo lasso di tempo: in tal modo potrebbero verificarsi degli alti valori medi della temperatura e gradienti termici abbastanza bassi.

Quando una struttura reale subisce un incendio, allora vi è una combinazione di deformazioni meccaniche, causate sia dalle dilatazioni termiche non permesse, sia dai carichi che sono stati applicati. L'insieme di questi fattori comporta il superamento dei limiti di snervamento dei materiali, causando delle plasticizzazioni molto estese. La deformata della struttura, invece, è legata solo alle deformazioni nel loro complesso, che possono considerarsi piccole se presente un adeguato livello di vincolo, ma sono in grado di creare grandi deflessioni, aventi un'inferiore domanda di deformazioni plastiche, in presenza di deformazioni plastiche estese o di un basso livello di vincolo. Tali deduzioni evidenziano come la risposta strutturale sia complessa durante l'incendio e come non sia sempre esaminabile con le classiche metodologie di calcolo a freddo "a freddo".

I concetti sopra riportati saranno approfonditi per una maggiore precisione e chiarezza, tenendo conto delle configurazioni strutturali semplici ed applicando delle espressioni analitiche per gli eventi di grande riguardo.

10.2 DILATAZIONE TERMICA IN ELEMENTI ISOSTATICI

L'aumento delle temperature comporta una dilatazione termica dei materiali strutturali ε_T e, dunque, dei medesimi elementi. Questi due fattori possono ricavarsi con:

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T$$

Se viene applicato un aumento uniforme della temperatura ΔT ad una trave che risulta solo appoggiata e senza dei vincoli assiali, si otterrà una dilatazione della trave uguale a:

$$\Delta L = \alpha \Delta T l$$

Dal momento che la deformazione totale ε_t equivale alla deformazione termica e che le deformazioni di tipo meccanico sono uguali a zero, non è sviluppato alcun tipo di stato tensionale.

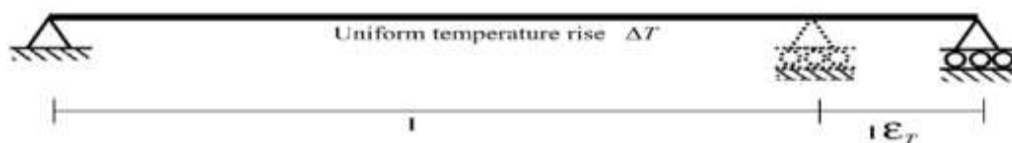


Figura 10.2-Dilatazione assiale

10.3 DILATAZIONE TERMICA IN PRESENZA DI VINCOLI RIGIDI ALLA TRASLAZIONE

Ora si prenda in considera una trave vincolata in maniera rigida alla traslazione e che subisce un aumento uniforme delle temperature ΔT .

$$P = EA\varepsilon_m = -EA\varepsilon_T = -EA\alpha\Delta T$$

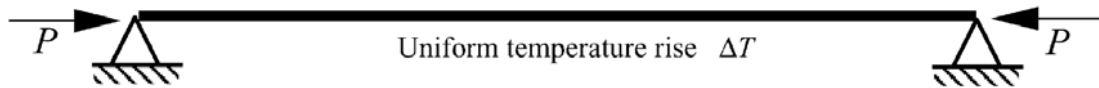


Figura 10.3-Sforzo normale di compressione

Nel caso in esame la trave non può ovviamente allungarsi, dunque si avrà una deformazione totale ε_T pari a zero, evidenziando una mancanza di spostamenti. Si sviluppa, comunque, una reazione di vincolo P, che origina sulla trave una deformazione uguale e contraria alla deformazione di tipo termico, dunque di compressione, come evidenziato da:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_T + \varepsilon_m = 0 \Rightarrow \varepsilon_T = -\varepsilon_m$$

E' presente, quindi, un regime uniforme di tensioni di tipo assiale all'interno della trave, pari a:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_m \Rightarrow P = A \cdot \sigma = A \cdot E \cdot \varepsilon_m = -A \cdot E \cdot \varepsilon_T = -A \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Presumendo un aumento indefinito della temperatura, è possibile che si verifichino due risposte strutturali conseguentemente alla snellezza della trave:

- Con una trave abbastanza tozza, la tensione superficiale eguaglia la tensione di snervamento del materiale e, se il materiale presenta un legame costitutivo tensione deformazione del tipo elasto-plastico, la trave snerva senza altri aumenti della tensione, ma sarà capace di immagazzinare maggiori incrementi delle deformazioni plastiche. L'aumento della temperatura che porta allo snervamento ΔT^* si definisce come segue, una volta che si è posto $\sigma = f_y \Rightarrow E \cdot \alpha \cdot \Delta T^* = f_y$:

$$\Delta T^* = \frac{f_y}{E \cdot \alpha}$$

In cui:

- E indica il modulo di elasticità appartenente al materiale;
- f_y si riferisce alla tensione di snervamento del materiale;

- α è il coefficiente di dilatazione termica.
- Una trave snella, d'altro canto, diventa subito instabile ancor prima del raggiungimento della tensione di snervamento. Il carico critico di Eulero per una colonna o una trave è pari a:

$$P_{cr}(T) = \frac{\pi^2 \cdot E(T) \cdot I}{l^2}$$

Eguagliando l'espressione della reazione vincolare si ha:

$$E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E(T) \cdot I}{l^2}$$

La quale porta ad un valore critico dell'aumento della temperatura, in relazione all'instabilità, equivalente a:

$$\Delta T_{cr} = \frac{\pi^2}{\alpha} \cdot \left(\frac{\rho}{l}\right)^2 = \frac{\pi^2}{\alpha \lambda^2}$$

Dove:

- l lunghezza libera d'inflessione, che dipende dalle condizioni di vincolo;
- λ è il rapporto di snellezza;
- ρ raggio di inerzia.

Se si dovesse verificare un continuo aumento della temperatura, la reazione vincolare nel suo complesso rimarrà costante, se si considera un materiale elastico senza alcun tipo di decadimento termico, invece, le deformazioni termiche indurranno un incremento dell'inflessione della trave δ .

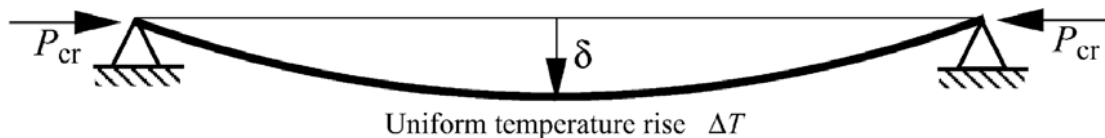


Figura 10.4-Freccia

I due eventi sopra descritti rappresentano le principali tipologie di risposta delle travi soggette alla dilatazione termica e vincolate assialmente. Ognuna delle due può avere luogo in base alla snellezza della trave o alla combinazione fra instabilità e snervamento.

10.4 DILATAZIONE TERMICA IN PRESENZA DI VINCOLI LATERALI DEFORMABILI

Le travi, ovviamente, non sono libere di allungarsi, come avviene nel caso della trave isostatica, così come non sono del tutto vincolate, come dimostra il precedente caso, il quale mostra un limite superiore impossibile da registrare: un caso più reale, infatti, avrebbe una considerazione finita dei vincoli di rigidità.

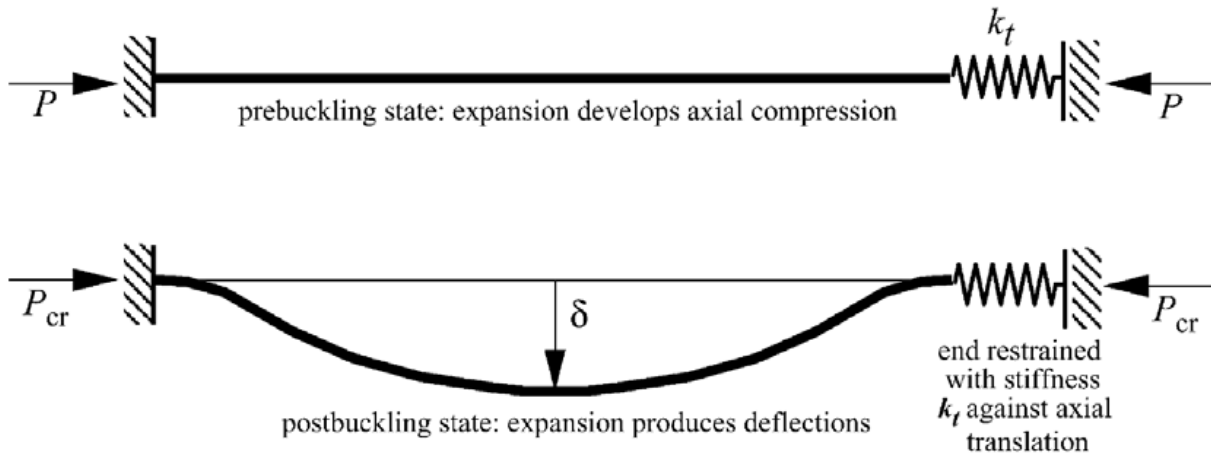


Figura 10.5- Dilatazione termica in presenza di vincoli laterali deformabili

Nella figura si può osservare una trave vincolata assialmente per mezzo di molle traslazionali, aventi una rigidità k_t . La tensione assiale di compressione, che si sviluppa per mezzo della dilatazione termica, è uguale a:

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 + \frac{E \cdot A}{k_t \cdot l}}$$

Mentre la temperatura critica di buckling è espressa come:

$$\Delta T_{cr} = \frac{\pi^2}{\alpha \cdot \lambda^2} \left(1 + \frac{E \cdot A}{k_t \cdot l} \right)$$

Tale equazione mostra come gli eventi di buckling e ad esso successivi si presentino a temperature attorno ai 300° C nelle strutture aventi vincoli assiali di rigidità confrontabili alla rigidità assiale del medesimo elemento (EA/l).

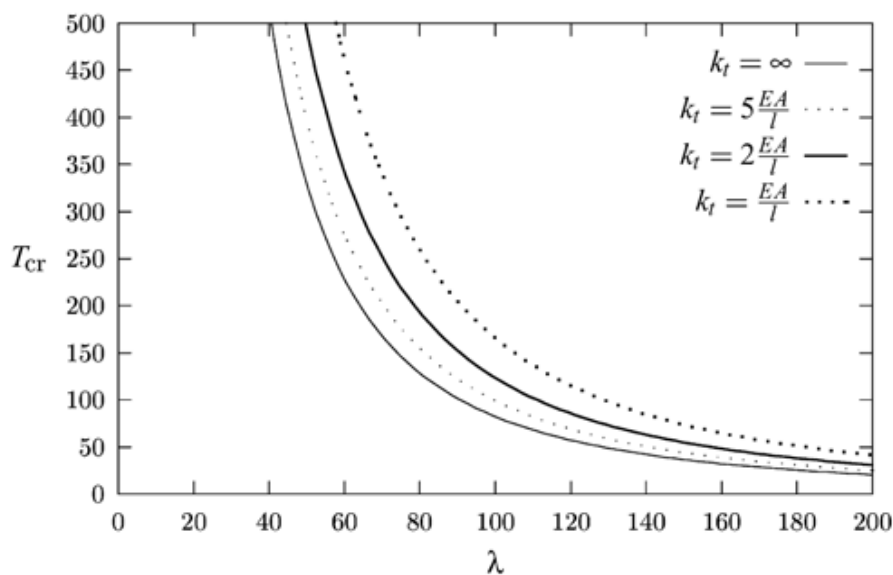


Figura 10.6- Temperatura critica

Il grafico in figura deriva dall'equazione espressa in precedenza, per cui le temperature critiche di buckling sono illustrate con riferimento alla snellezza per i diversi valori della rigidità del vincolo. Si evidenzia come il livello di vincolo necessario per giungere alla temperatura di buckling non sia molto alto per le sezioni snelle. Considerando che la rigidità di tipo assiale dell'elemento risulta ridotta per l'aumento delle temperature con la diminuzione del modulo di elasticità, è probabile che negli incendi reali si evidenzino tali eventi di post-buckling all'interno delle travi.

10.5 CINEMATICA DELLA TRAVE SOGGETTA A CARICO DI INCENDIO A TEMPERATURA NON UNIFORME

Generalmente, la trave subisce un riscaldamento non uniforme: ciò è dato dalla presenza di elementi di solaio che sono contigui rispetto la flangia superiore propria della trave, la quale, conseguentemente al calore trasmesso a quest'ultimi, subisce un aumento delle temperature minore rispetto alla flangia inferiore: ciò comporta l'origine di gradienti termici nella sezione, i quali creano tensioni di coazione.

Oltretutto, occorre che si considerino eventuali vincoli di estremità della trave, i quali sono in grado di far fronte all'espansione termica dell'acciaio, come per la colonna di un edificio a più piani con una struttura intelaiata e pareti rigide. Lo sforzo assiale, causato dall'impossibilità di sviluppare una deformazione, è capace di portare velocemente la trave oltre il carico critico di compressione, con formazione di una deformata post-critica.

Dopo aver abbandonato la configurazione rettilinea mostrata inizialmente, la trave può comunque resistere a ragguardevoli momenti flettenti, mentre lo sforzo assiale di compressione può confinare quello nella flangia inferiore, la quale risulta

maggiormente calda e meno resistente. Si deve considerare, inoltre, che nella deformata post-critica la trave riesce a raggiungere, conseguentemente all'espansione, ragguardevoli frecce per lo più non reversibili.

Qui di seguito saranno analizzati singolarmente i vari meccanismi di dilatazione termica (Usmani et Al, 2001), al fine di realizzare un modello di calcolo complessivo.

L'Eurocodice EN 1991-1-2 considera le azioni indirette, eccezion fatta per i seguenti casi:

- Si considerano modelli di vincoli e di condizioni al contorno del tipo conservativo e/o tenute in conto in maniera implicita da prescrizioni conservative di resistenza al fuoco;
- Le azioni indirette possono essere irrilevanti oppure possono essere chiaramente in favore della sicurezza;

Dal momento che le condizioni utili per non considerare le azioni indirette hanno bisogno di sensibilità ed impegno nei calcoli, raffrontabili a quelli utili per tener conto delle stesse azioni indirette, l'Eurocodice ammette un'alternativa:

“Le azioni indirette indotte da elementi adiacenti possono non essere prese in considerazione quando i requisiti di resistenza al fuoco fanno riferimento alla curva di incendio standard”.

È evidente che il normatore consideri l'uso di questa curva come un tipo di condizione completamente conservativa.

10.6 DEFORMAZIONE PER VARIAZIONE TERMICA LINEARE (THERMAL BOWING)

L'effetto catenaria è del secondo ordine ed è delineato dalle grandi curvature, basate su dilatazioni termiche non uniformi all'interno delle sezioni trasversali.

Se la membratura risultasse libera di muoversi, essa sarebbe portata ad incurvarsi, avvicinando le estremità nel momento in cui vi fosse lo sviluppo di grandi curvature. Considerando la trave riportata nella figura, dove sono osservabili i vincoli d'estremità elastici, i quali rendono rigida la trave rispetto ai movimenti di rotazione dei punti d'appoggio e a quelli assiali, la distribuzione trasversale della temperatura è da considerarsi suddivisa nelle sue varie componenti, lineare, costante ed antisimmetrica.

A causa di tale modifica termica del tipo antisimmetrico, la trave si comporta seguendo una curva deformata, la quale avvicina gli appoggi della trave stessa. Prendendo in

considerazione la curvatura conseguente alla temperatura χ , si evidenziano queste relazioni:

$$\chi = \alpha \frac{\theta_t - \theta_b}{y_t - y_b}$$

$$\phi = \frac{L}{2} \chi$$

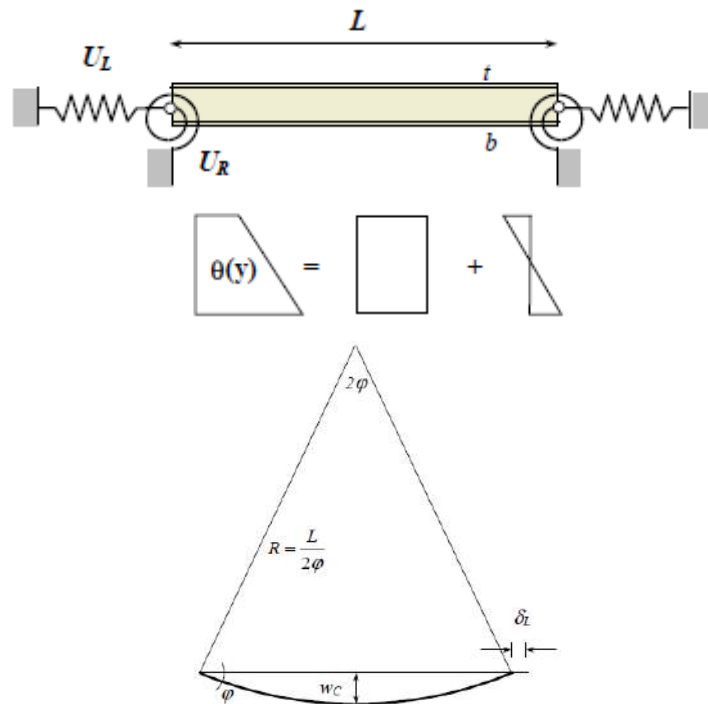


Figura 10.7-Deformazione per variazione termica lineare

Considerando che la deformata della linea dell'asse possa essere delineata per mezzo di una funzione $\sin(x)$, si ottengono i presenti spostamenti:

$$\varepsilon_R = 1 - \frac{\sin\phi}{\phi}$$

$$\delta_L = \varepsilon_R L$$

$$w_c = \frac{2L}{\pi} \sqrt{\varepsilon_R + \frac{\varepsilon_R^2}{2}}$$

Qualora si considerasse il vincolo alla rotazione all'estremità della trave, il momento improduttivo della deformazione termica lineare, del tipo antisimmetrico in relazione alla base, è pari a:

$$M_R = \frac{EJ\chi}{1 + \frac{2EJ}{U_R L}}$$

Mentre la curvatura propria della trave:

$$\chi_R = \chi \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2EJ}{U_R L}} \right)$$

Per valutare la freccia che consegue l'apparente deformazione assiale e la curvatura, si può realizzare con l'applicazione delle formule linearizzate:

$$\delta_L \approx \frac{L^3}{24} \chi^2; \quad w_c \approx \frac{L^2}{8} \chi$$

Le membrature, se si trovassero in una condizione di vincolo non sufficiente, potrebbero smarrire gli appoggi.

10.7 DEFORMAZIONE PER VARIAZIONE TERMICA COSTANTE (THERMAL EXPANSION)

La deformazione, causata da una variazione dal punto di vista termico, può arrecare un serio pericolo nel caso di travi vincolate all'estremità in direzione assiale, poiché comporta un'instabilità da parte della stessa trave. La verifica è molto semplice e può essere realizzata con un'equazione di congruenza degli spostamenti assiali della trave. Oltre ai vincoli, si può tener conto della conseguente diminuzione da parte della variazione termica lineare.

Considerato il valore della temperatura media uguale a $\bar{\theta} = (\theta_s + \theta_i)/2$, si ottiene:

$$N = \frac{(\alpha\bar{\theta} - \varepsilon_R)EA}{1 + \frac{2EA}{U_L L}}$$

L'allungamento si definisce, invece, come:

$$\delta_N = \frac{N}{U_L} = \left(\frac{\alpha\bar{\theta} - \varepsilon_R}{\frac{U_L}{EA} + \frac{2}{L}} \right)$$

Lo sforzo assiale creato dall'impossibilità di allungamento è in grado, dopo aver registrato un'adeguata temperatura, di portare allo svergolamento della trave. Livellando il valore dello sforzo assiale in funzione della temperatura con quello causato dall'instabilità Euleriana della trave, si avrà:

$$N(\bar{\theta}) = N_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_{fi}^2}$$

E' giusto ricordare che il valore della snellezza nell'eventualità di un incendio non è equivalente a quella ordinaria, poiché le condizioni di vincolo degli elementi strutturali possono subire variazioni a causa di azioni localizzate.

Mediante la risoluzione per mezzo dell'ignota temperatura critica, si avrà:

$$\bar{\theta}_{cr} = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\pi^2}{\lambda_{fi}^2} \left(1 + \frac{2EA}{U_L L} \right) + \varepsilon_R \right]$$

Nel momento in cui la temperatura aumenta e oltrepassa la soglia critica, la trave inizia ad entrare in una configurazione variata, assumendo una freccia trasversale che diminuisce lo sforzo assiale fin sotto il valore di carico critico. Nel caso in cui si dovesse osservare che l'allungamento, solitamente equivalente a quello complessivo a cui è sottratto quello alla mancata stabilità, non possa venire accumulato dalla trave, allora diviene una freccia trasversale, proprio come delineato dalle formule e dalle loro semplificazioni.

Si può evidenziare, inoltre, che la variazione termica del tipo lineare sulla sezione risulta favorevole alla stabilità, poiché, dopo l'incurvamento, si crea un accorciamento apparente dell'asse della trave. Nelle seguenti figure, estrapolate da Usmani et Al., 2001, si evidenzia l'aumento della temperatura critica, causato dal gradiente, e l'aumento di freccia conseguentemente alla variazione della temperatura per ciò che concerne una trave presa come campione.

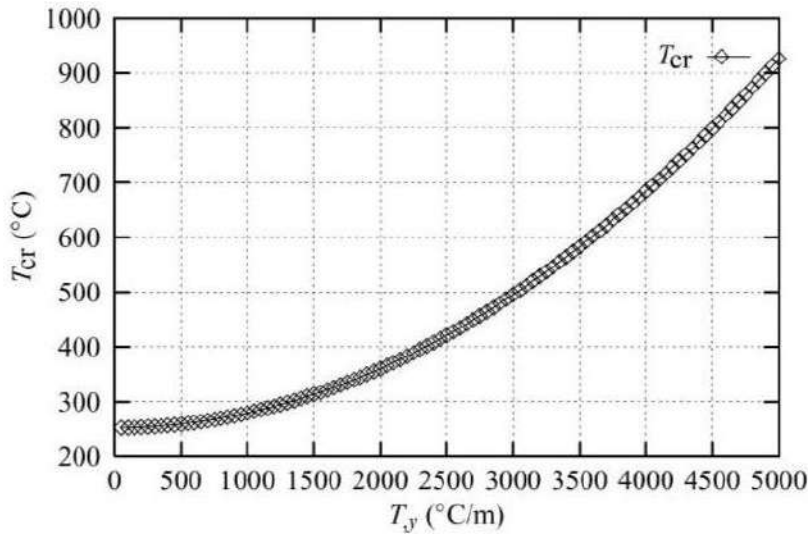
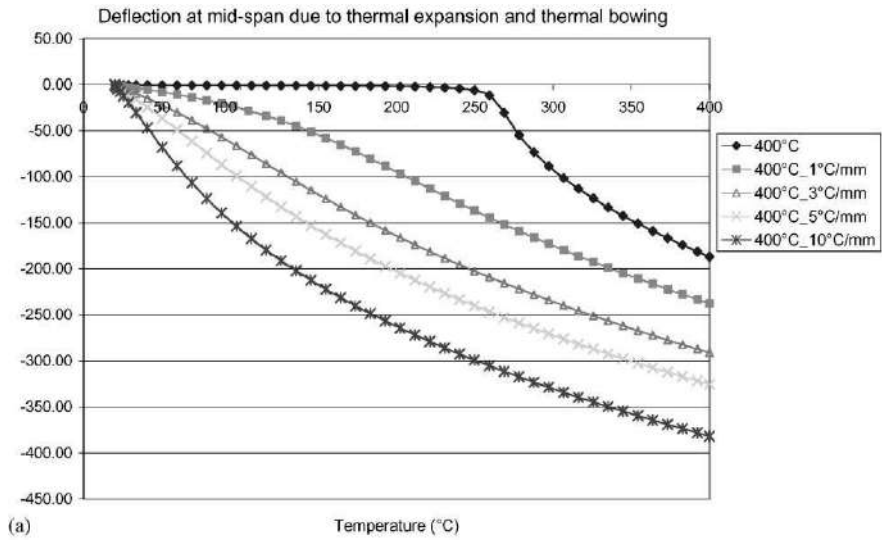
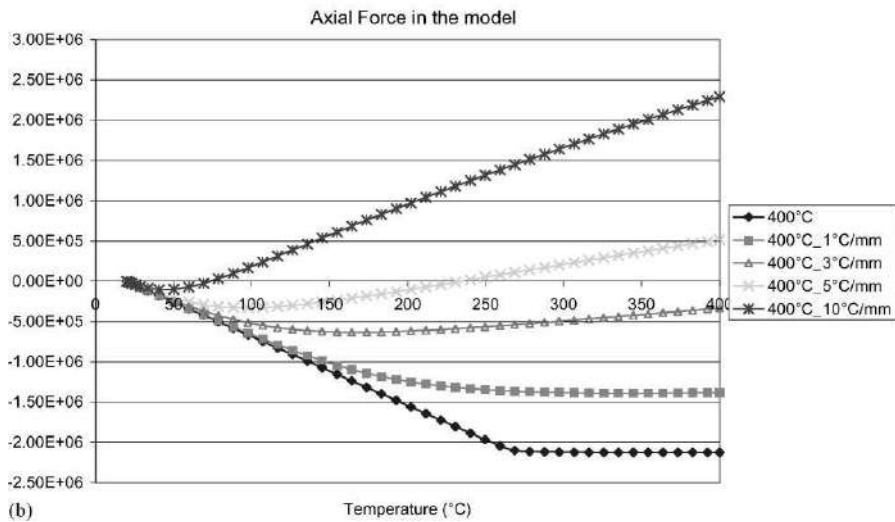


Figura 10.8-Temperatura critica



(a) Temperature (°C)



(b) Temperature (°C)

10.8 STATICA DELLA TRAVE SOGGETTA A RISCALDAMENTO

Qui si riporta lo schema concettuale concernente il conseguimento della condizione limite in una trave sottoposta ad un elevato aumento delle temperature.

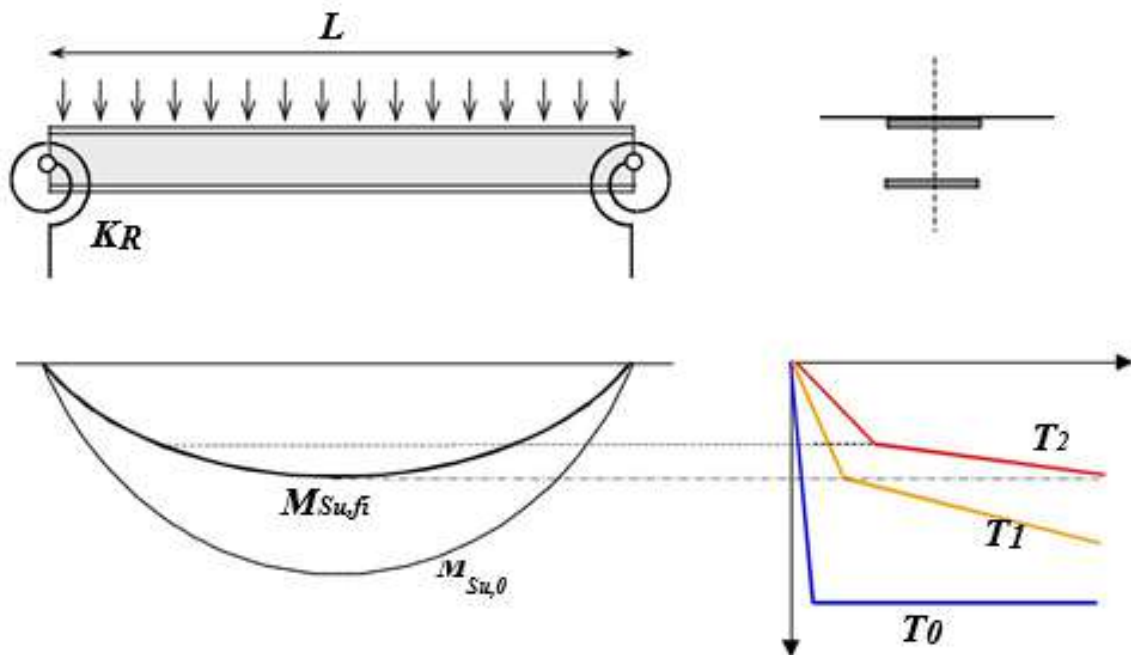


Figura 10.10-Statica della trave soggetta a riscaldamento

La trave, nelle condizioni di temperatura ordinaria, è realizzata in modo da resistere ai carichi tipici (frattile 95%), presentando una sicurezza del 50% d'aumento degli stessi carichi.

Al sopraggiungere dell'incendio, i carichi che si trovano sulla trave sono probabilisticamente minori rispetto al valore caratteristico, creando una riserva di resistenza della trave che sarà utilizzata per far fronte alla perdita della resistenza, provocata dal riscaldamento.

Si osservi la situazione di partenza, dove la resistenza in condizioni ordinarie è espressa dalla curva $\sigma - \epsilon$ marcata con T_0 . Proprio come raffigurata dalla figura 3, il punto limite del comportamento di tipo elastico del materiale diminuisce con l'aumentare della temperatura, fino al completo raggiungimento della curva T_1 . A questa temperatura la sezione più sollecitata appartenente alla trave entra nel campo plastico e, poiché il materiale deve ricorrere all'incrudimento per preservare lo stato tensionale che viene richiesto, si verifica un veloce e rilevante aumento della deformazione. La curva T_2 , la quale presenta una sezione centrale con un raggiungimento della deformazione limite sulla curva che illustra il comportamento dell'acciaio, s'innesta.

La trave collassa, con una temperatura pari a T_2 .

Di seguito, si proverà a definire un metodo di calcolo semplice, idoneo per permettere una stima dell'abbassamento di collasso della trave e un'opportuna stima del carico.

10.9 RAGGIUNGIMENTO DEL LIMITE ELASTICO DELLA TRAVE

Si analizzano le travi progettate con profilati in grado di essere schematizzati per mezzo di sistemi di due masse concentrate. Tale analisi si può estendere fino a considerare l'anima, ma non si otterranno dei risultati di molto differenti.

Sono introducibili le relazioni:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_t \frac{H - y_e}{y_e}$$

$$\varepsilon_t E(\theta_t) A_t = \varepsilon_b E(\theta_b) A_b = N = \frac{M(x)}{H}$$

Da cui si ricava velocemente y_e ; s'introduce inoltre la posizione $u = E_t/E_b$, ottenendo:

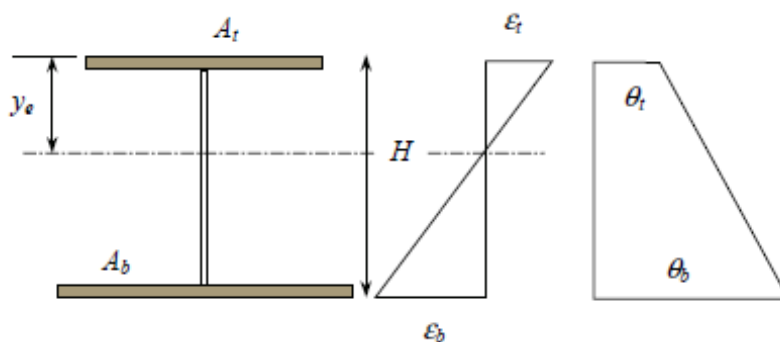
$$t_e = H \frac{A_b}{A_t u + A_b}$$

Se si dovesse computare il momento statico della sezione e s'indichi con A_w l'area appartenente all'anima, si avrà:

$$y_e = H \frac{A_b + \frac{A_w(2+u)}{6}}{A_t u + A_b + \frac{A_w(1+u)}{2}}$$

E se si volesse tenere in conto l'anima:

$$J_e = y_e^2 A_t u + (H - y_e)^2 A_b + A_w \left[\frac{H^2(1+3u)}{12} - \frac{H y_e(1+2u)}{3} + \frac{y_e^2(1+u)}{2} \right]$$



Per mezzo della formula di Navier alle flange, è possibile calcolare il momento al limite del comportamento:

$$M_e = \min \left[f_p(\theta_t) \frac{J_e}{y_e u}, \frac{f_p(\theta_b) J_e}{H - y_e} \right]$$

Il momento d'inerzia si può anche applicare per il calcolo della freccia:

$$w_c = c(q_{fi} L^4) / (E(\theta_b) J_e)$$

10.10 RAGGIUNGIMENTO DEL LIMITE ULTIMO

In tal caso, la flangia inferiore subisce una deformazione superiore a quella del comportamento elastico. Le deformazioni, capaci di permettere al materiale di entrambe le flange di portare all'equilibrio il momento esterno, sono pari a:

$$\sigma_t = \varepsilon_t E(\theta_t) = \frac{M(x)}{A_t H}$$

$$\sigma_b = f_p(\theta_t) + (\varepsilon_b - \varepsilon_y) E_h(\theta_t) = \frac{M(x)}{A_t H}$$

Il modulo plastico di incrudimento, invece, è uguale a:

$$E_H(\theta_b) = \frac{f_y(\theta_b) - f_p(\theta_b)}{\varepsilon_u - \varepsilon_y}$$

Prendendo in conto la linearità del diagramma di deformazione, si avrà:

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_t (H - y_p)}{y_p}$$

Riportando la condizione di equilibrio e assumendo il rapporto delle deformazioni, si ricava il valore di y_p :

$$y_p = \frac{H}{1 + \frac{E_t A_t}{E_H A_b} \left[1 - (f_p - \varepsilon_y E_H) \frac{A_b H}{M_{S,fi}} \right]}$$

Con questo valore si ricava la curvatura plastica:

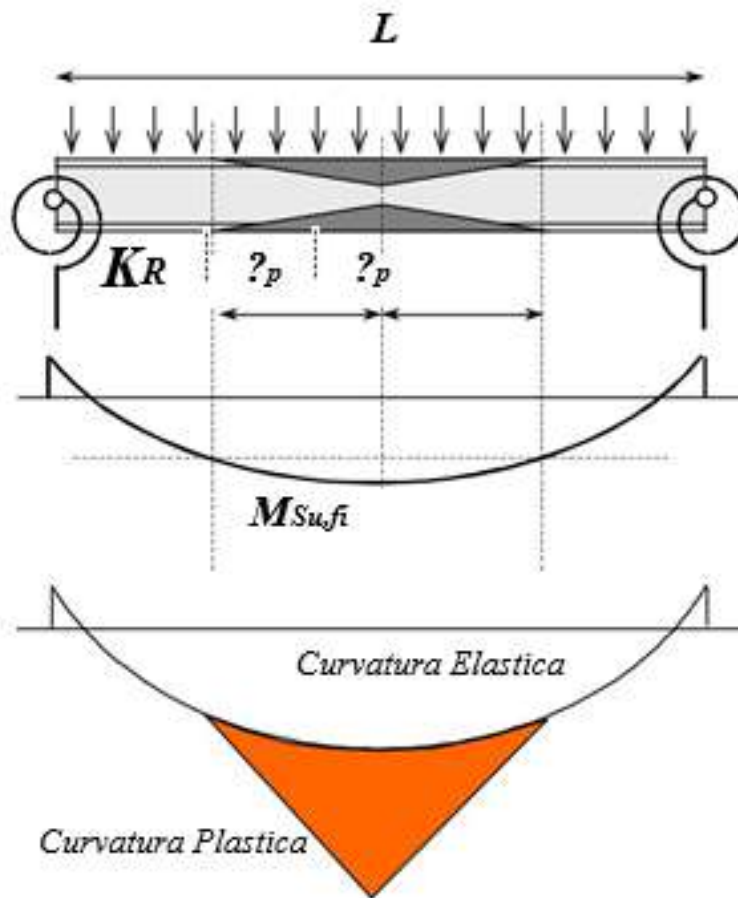
$$\chi_p = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_y}{H - y_p} = \frac{\varepsilon_t}{y_p} - \frac{\varepsilon_y}{H - y_p}$$

Mentre la zona plastica si definisce come:

$$l_p = \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{HA_b f_p(\theta_b)}{M_{max,fi}}}$$

La curvatura plastica permette un abbassamento ed una rotazione concentrata alla freccia completa della trave:

$$w_p = \frac{\chi_p l_p^2}{6} + \frac{\chi_p l_p}{4} (L - 2l_p)$$



11 VALIDAZIONE ANALISI MECCANICA

Si discutono i fenomeni statici e dinamici appena trattati con metodo FEM, tramite l'ausilio del software di calcolo STRAUS7.

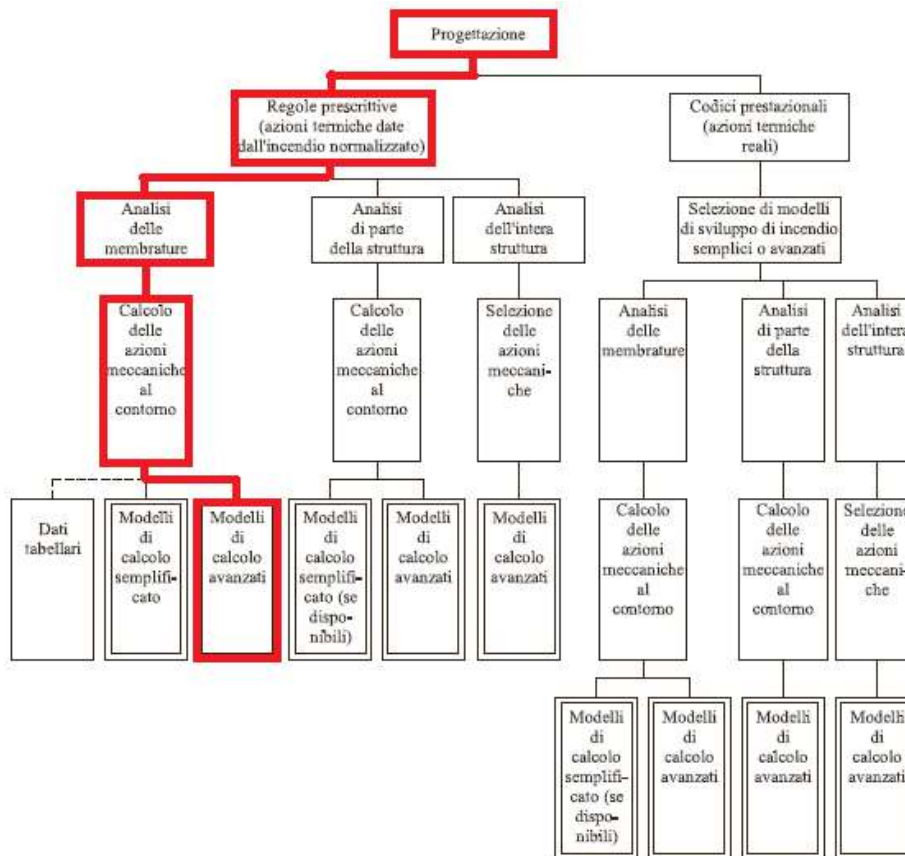


Figura 11.1-Percorso di progettazione

11.1 BOWING EFFECT E CATENARIA

Si considera una delle colonne del modello di studio, in particolare una delle travi HEA 220, costituente il telaio.



Figura 11.2-Membratura oggetto di studio

Sulla trave verrà applicato il carico gravitazionale, nonché il carico uniformemente distribuito secondo il sistema di riferimento globale, derivato dai carichi della copertura e calcolato nel progetto a freddo, pari a 5kN. (Il progetto a “freddo” verrà presentato nei capitoli successivi”)

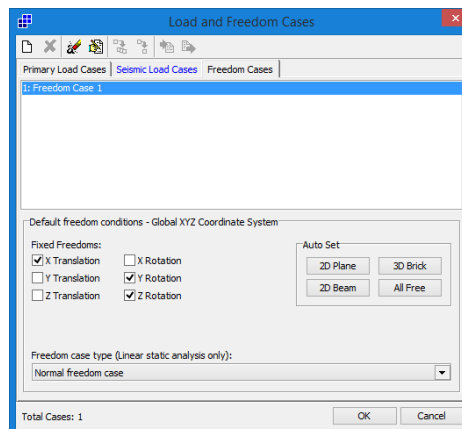


Figura 11.3-Settaggi Straus7

Ponendosi in 2d Beam, si considera una condizione di vincolo agli estremi della trave, discretizzata in 20 elementi beam di appoggio-carrello.

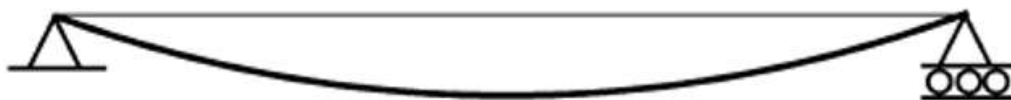


Figura 11.4-Schema statico

Nella struttura globale, questo comportamento si modella tramite un end-release di tipo rotazionale ad un solo estremo della trave in questione.

Note le Boundary Condition sul piano YZ, si applica la curva termica di riscaldamento dell'elemento.

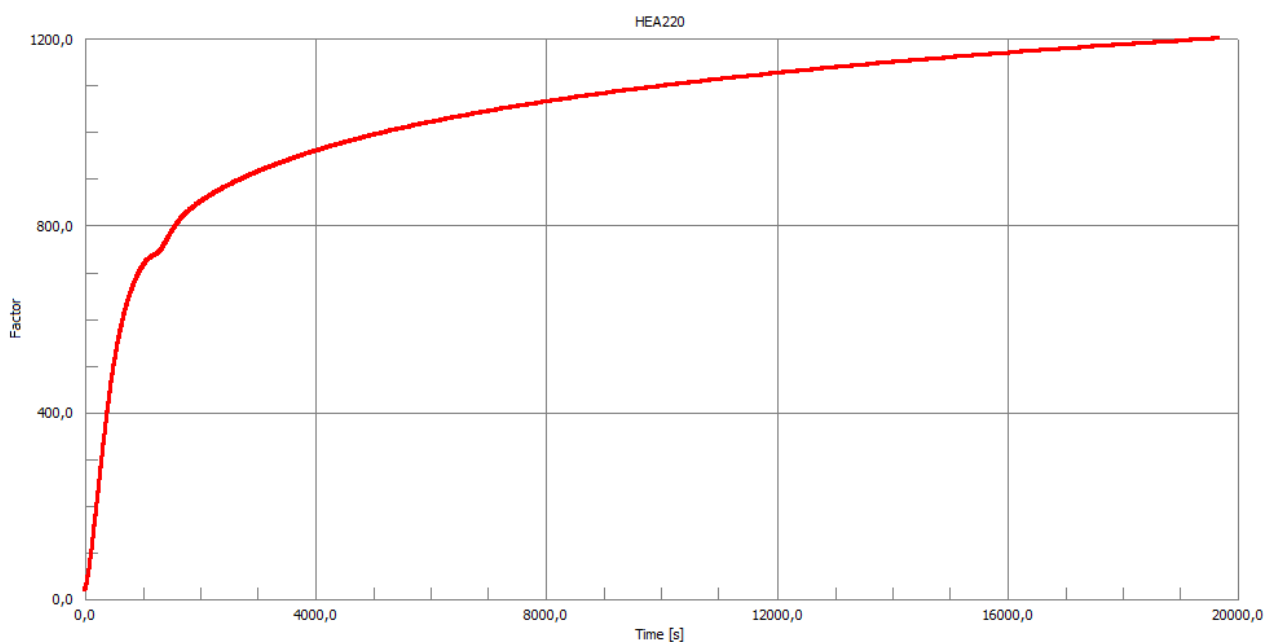


Figura 11.5-Curva di riscaldamento

La trave ha lunghezza di 8.476 m.

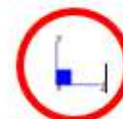
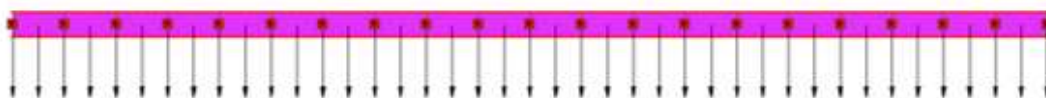


Figura 11.6-Discretizzazione trave

Inoltre si creano anche le diverse Table relative a:

- Calore specifico;
- Dilatazione termica;

- Conducibilità termica;
- Coefficiente k_E ;
- Coefficiente k_y ;
- Sforzo-deformazione.

Le seguenti Table saranno applicate di volta in volta nell'avanzare dell'analisi. Si partirà da un'analisi lineare quasi statica, per poi arrivare a considerare tutte le fonti di non linearità geometrica e meccanica in un'analisi non lineare quasi statica.

Nell'analisi quasi statica, si trascura il contributo delle forze d'inerzia che compaiono nell'equazione dell'equilibrio dinamico.

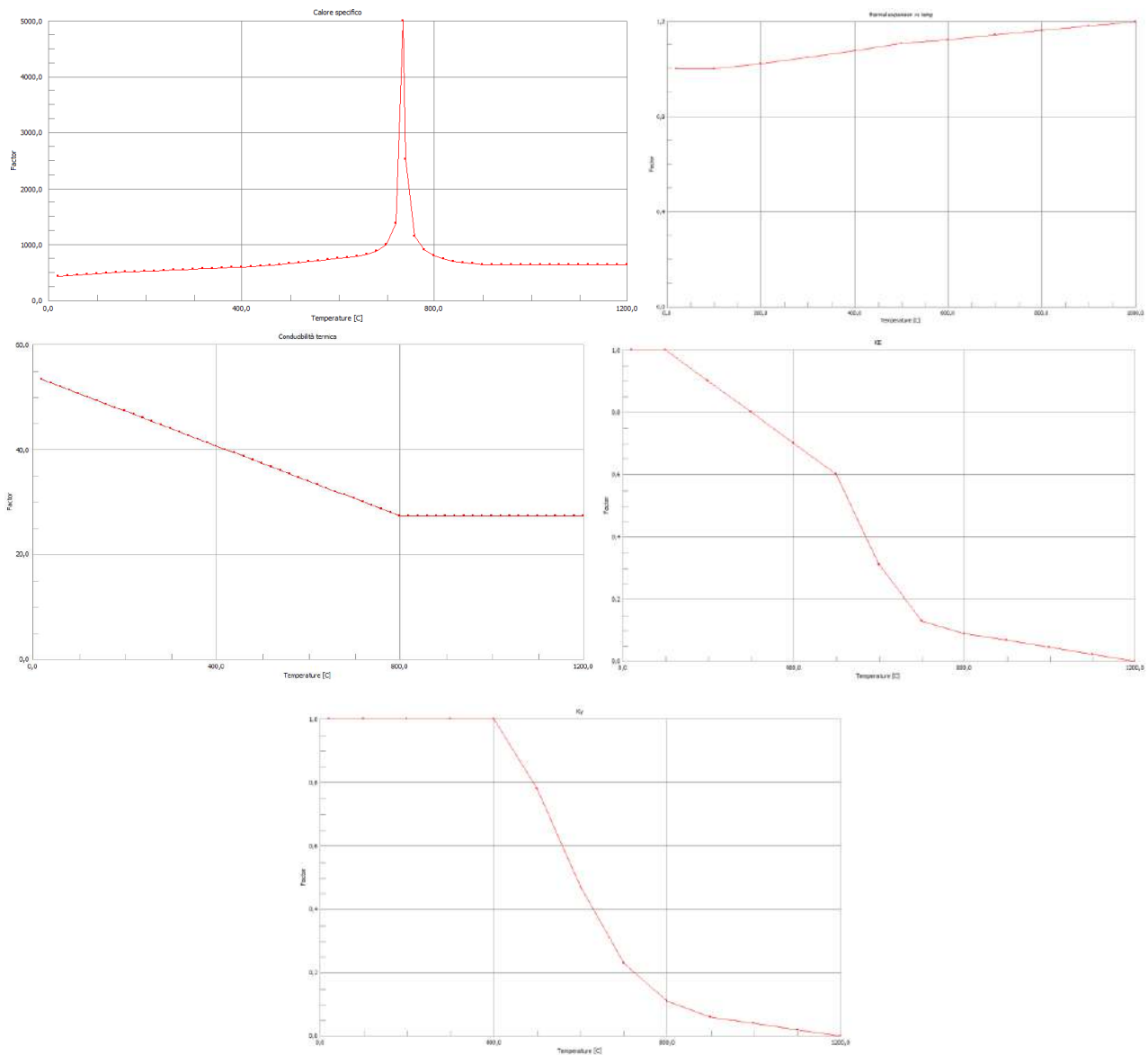


Figura 11.7- Table impostate su Straus7

Si utilizza acciaio tipo S275:

S275	modulo di young [Pa]	2,06E+11
	limite di snervamento [Mpa]	275
	limite a rottura caratteristica [Mpa]	430
ϵ		σ [Pa]
0		0
0,001334951		275000000
0,2		430000000

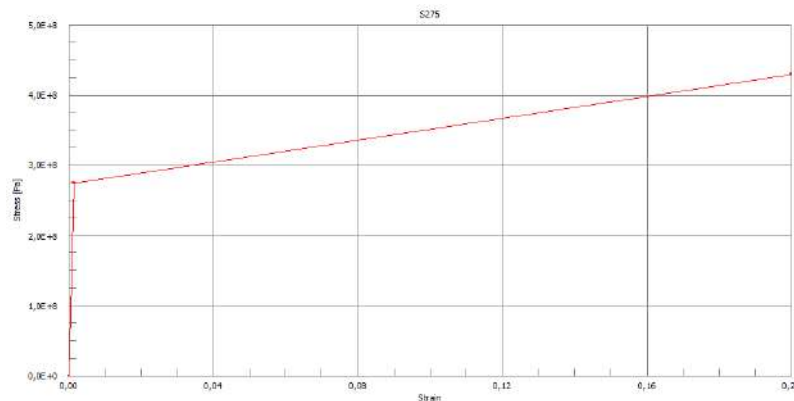


Figura 11.8-Curva sforzo deformazione per S275

Prima di poter svolgere l'analisi quasi statica, si esegue un'analisi termica, con ipotesi di riscaldamento uniforme tra intradosso ed estradosso, in modo da avere come input i valori di temperatura raggiunti negli elementi Beam nei diversi istanti di tempo, i quali influenzano le diverse proprietà meccaniche.

Per eseguire l'analisi termica transiente non lineare, in prima battuta, si assegnano le diverse caratteristiche termiche all'elemento.

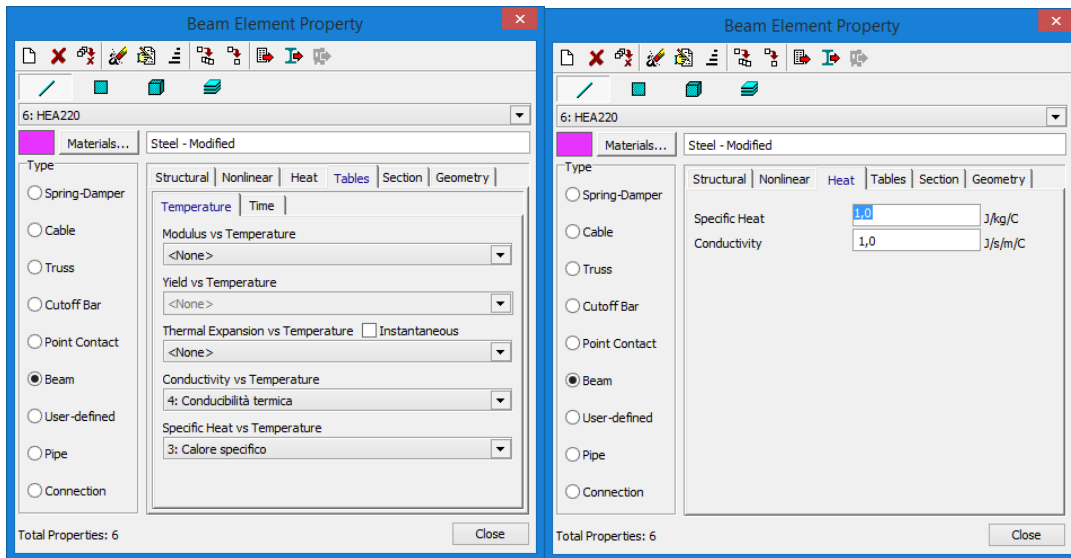


Figura 11.9-Settaggi Straus7

Si procede con l'analisi termica per un periodo pari a 6000s.

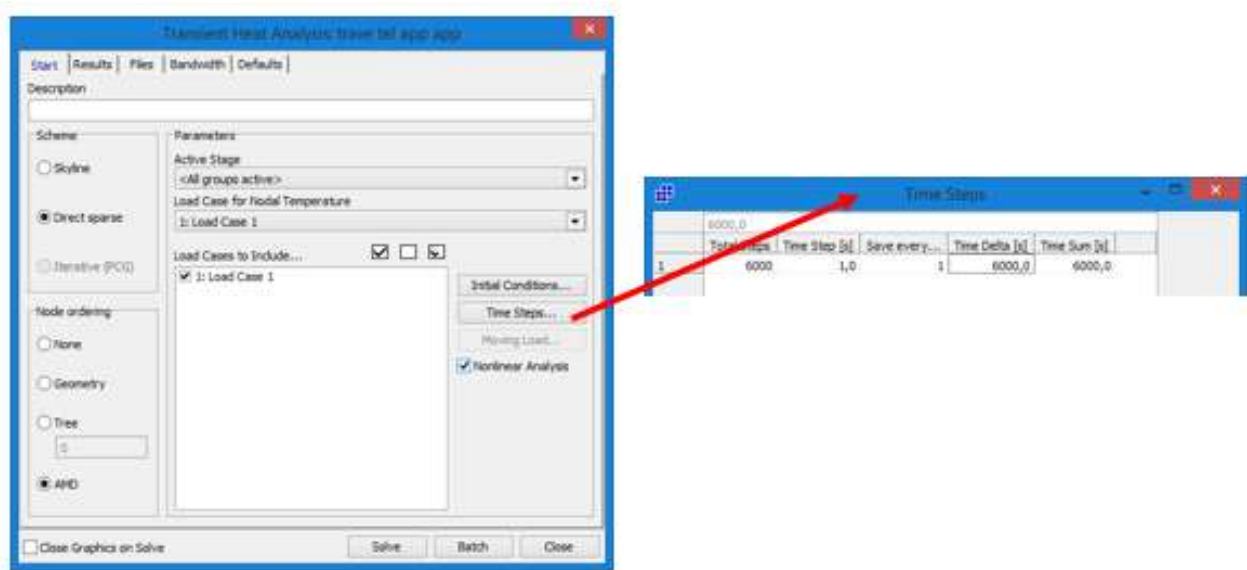


Figura 11.10-Settaggi Straus7

Ottenuto il file di output dall'analisi termica si procede con le analisi quasi statiche.

Si eseguono 4 analisi:

- Valore costante del modulo di Young, del limite di snervamento e della dilatazione termica, trascurando la non linearità geometrica;

- Valore variabile con la temperatura del modulo di Young, valori costanti del limite di snervamento e della dilatazione termica, non considerando la non linearità geometrica;
- Valori variabili con la temperatura del modulo di Young, del limite di snervamento e della dilatazione termica, trascurando la non linearità geometrica;
- Valori variabili con la temperatura del modulo di Young, del limite di snervamento e della dilatazione termica, tenendo conto della non linearità geometrica.

L'obiettivo finale è quello di validare le analisi svolte con STRAUS7, confrontandole con i valori di riferimento dedotti analiticamente dai modelli precedentemente analizzati.

CASO 1 – Valori costanti (Campo elastico)

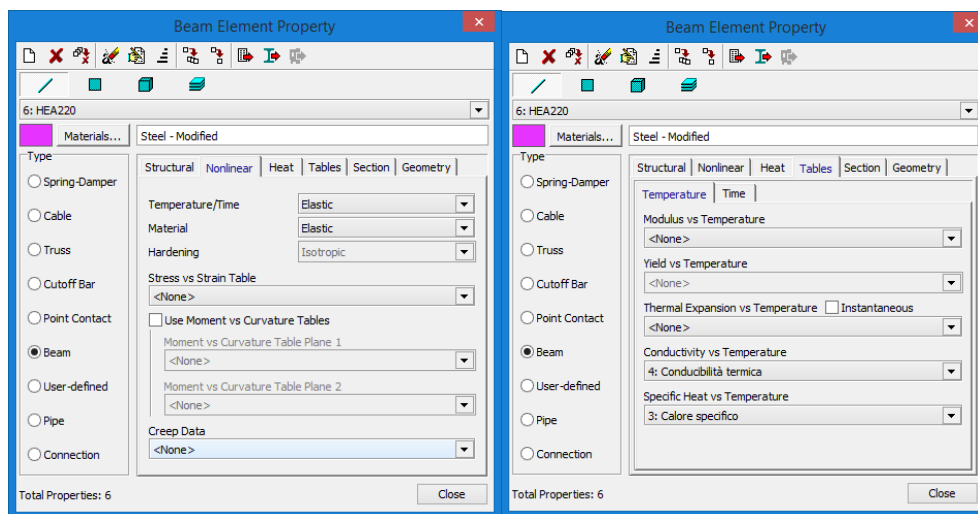


Figura 11.11 -Settaggi Straus7

Dopo aver impostato le caratteristiche geometriche e meccaniche del materiale, si procede con l'analisi quasi statica.

□
□

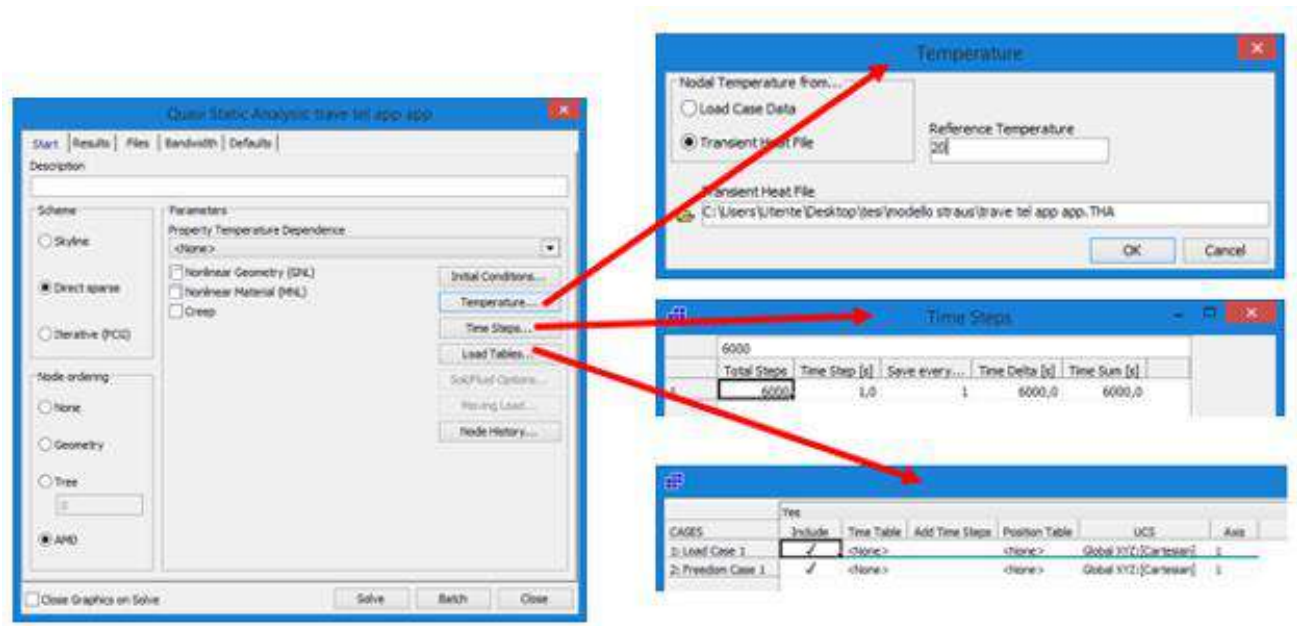


Figura 11.12-Settaggi Straus7

Si analizza la soluzione ottenuta.

Si studia lo spostamento del nodo in mezzeria n°2 rispetto al nodo all'appoggio n°3.

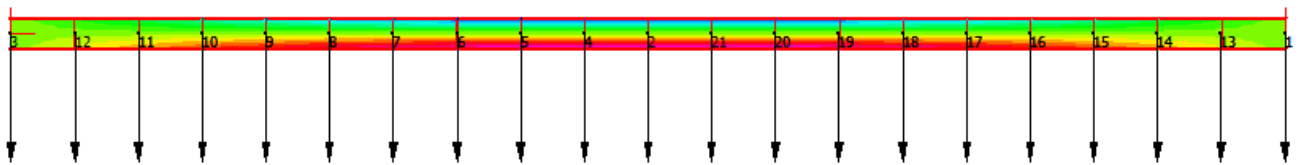


Figura 11.13-Andamento delle tensioni

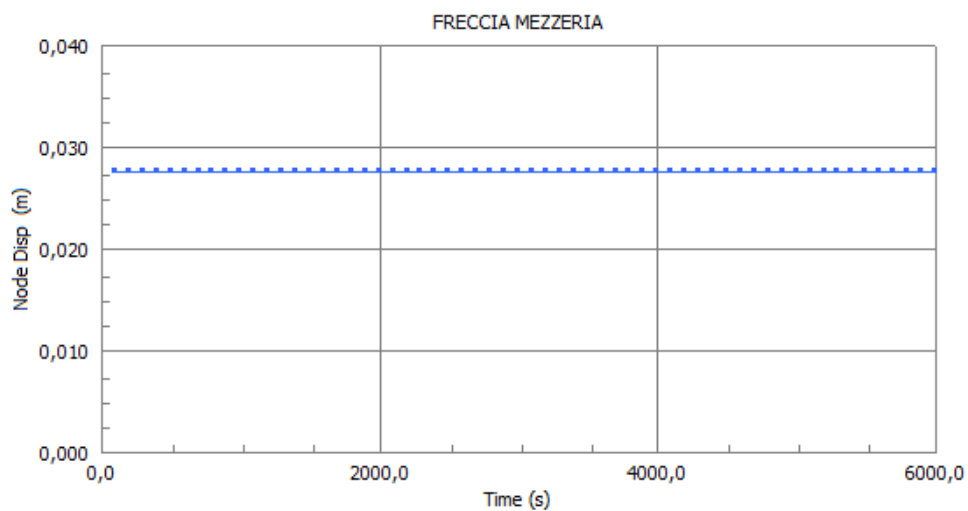


Figura 11.14-Spostamenti in mezzeria

	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RX (deg)	RY (deg)	RZ (deg)	X' (m)	Y' (m)	Z' (m)
Node 1	0,0	0,0	0,099169	-0,587567	0,0	0,0	1,0	16,165	26,5272
Node 2	0,0	-0,02755	0,049585	0,0	0,0	0,0	1,0	16,1375	22,2396
Node 3	0,0	0,0	0,0	0,587567	0,0	0,0	1,0	16,165	17,952
Node 4	0,0	-0,02722	0,044626	0,087841	0,0	0,0	1,0	16,1378	21,8108
Node 5	0,0	-0,026239	0,039668	0,17392	0,0	0,0	1,0	16,1388	21,3821
Node 6	0,0	-0,024625	0,034709	0,256473	0,0	0,0	1,0	16,1404	20,9533
Node 7	0,0	-0,022412	0,029751	0,333738	0,0	0,0	1,0	16,1426	20,5246
Node 8	0,0	-0,019644	0,024792	0,403952	0,0	0,0	1,0	16,1454	20,0958
Node 9	0,0	-0,01638	0,019834	0,465353	0,0	0,0	1,0	16,1486	19,667
Node 10	0,0	-0,012693	0,014875	0,516178	0,0	0,0	1,0	16,1523	19,2383
Node 11	0,0	-0,008666	0,009917	0,554663	0,0	0,0	1,0	16,1563	18,8095
Node 12	0,0	-0,004398	0,004958	0,579047	0,0	0,0	1,0	16,1606	18,3808
Node 13	0,0	-0,004398	0,094211	-0,579047	0,0	0,0	1,0	16,1606	26,0984
Node 14	0,0	-0,008666	0,089252	-0,554663	0,0	0,0	1,0	16,1563	25,6697
Node 15	0,0	-0,012693	0,084294	-0,516178	0,0	0,0	1,0	16,1523	25,2409
Node 16	0,0	-0,01638	0,079335	-0,465353	0,0	0,0	1,0	16,1486	24,8121
Node 17	0,0	-0,019644	0,074377	-0,403952	0,0	0,0	1,0	16,1454	24,3834
Node 18	0,0	-0,022412	0,069418	-0,333738	0,0	0,0	1,0	16,1426	23,9546
Node 19	0,0	-0,024625	0,06446	-0,256473	0,0	0,0	1,0	16,1404	23,5259
Node 20	0,0	-0,026239	0,059502	-0,17392	0,0	0,0	1,0	16,1388	23,0971
Node 21	0,0	-0,02722	0,054543	-0,087841	0,0	0,0	1,0	16,1378	22,6683

Figura 11.15-Spostamenti

Si nota una freccia costante di $w = -0.027m$ e spostamenti δ nulli.

Si calcola la soluzione in campo elastico di riferimento come:

$$w = \frac{5}{384} * \frac{(ql^4)}{EI} = -0.026 m$$

con

	Count	Sum (X)	Sum (Y)	Sum (Z)
Load case attributes:				
Distributed Force (Global) [1: Load Case 1]	20	0,0 kN	-42,38 kN	0,0 kN

Quindi l'analisi risulta convalidata dal risultato analitico.

CASO 2 – Variazione del modulo di Young

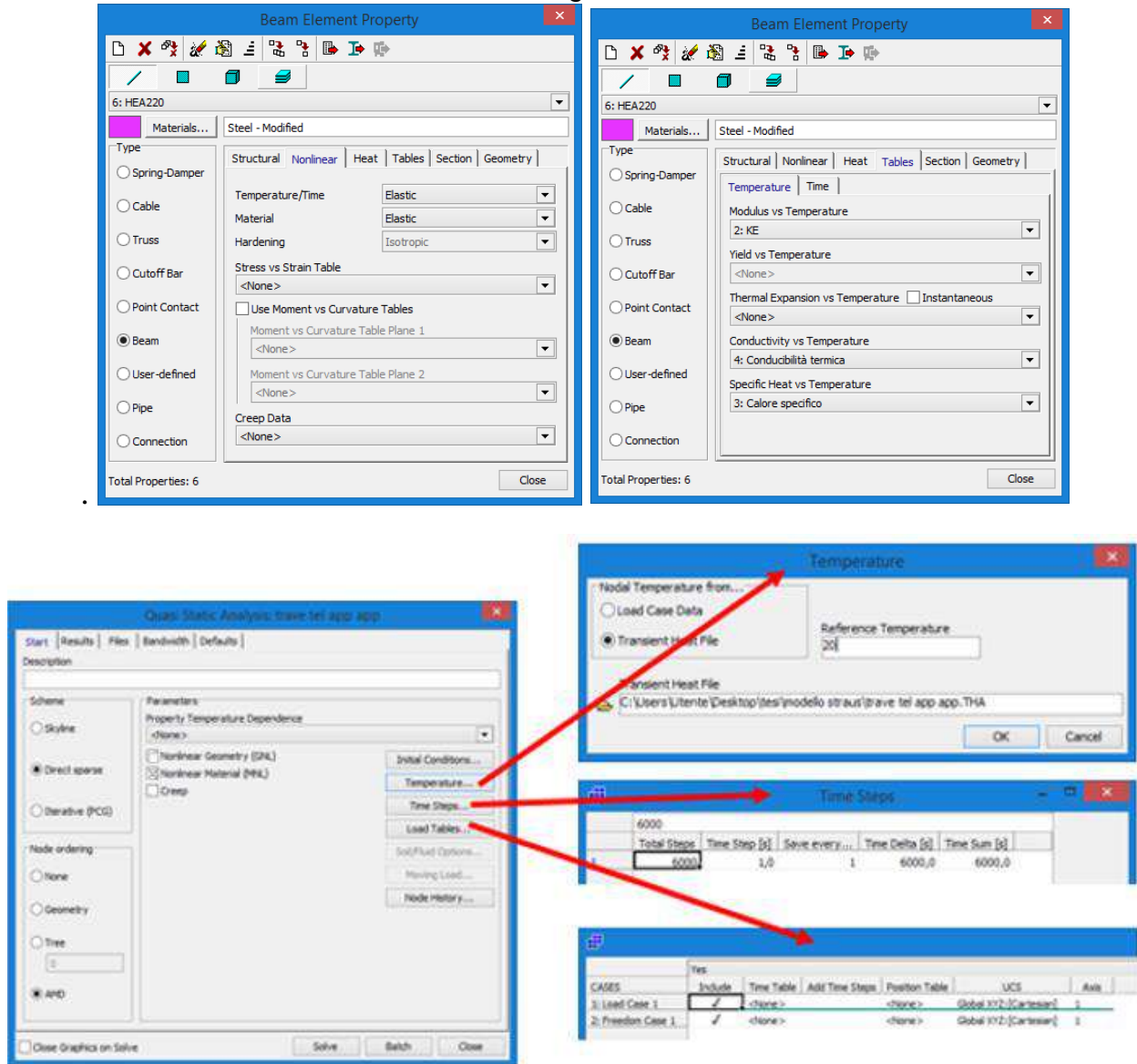


Figura 11.16-Settaggi Straus7

Si analizza la soluzione ottenuta.

Si studia lo spostamento del nodo in mezzeria n°2 rispetto al nodo all'appoggio n°3.

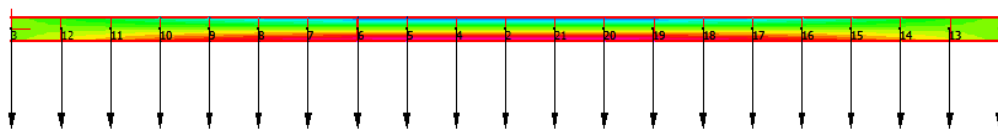


Figura 11.17-Andamento delle tensioni

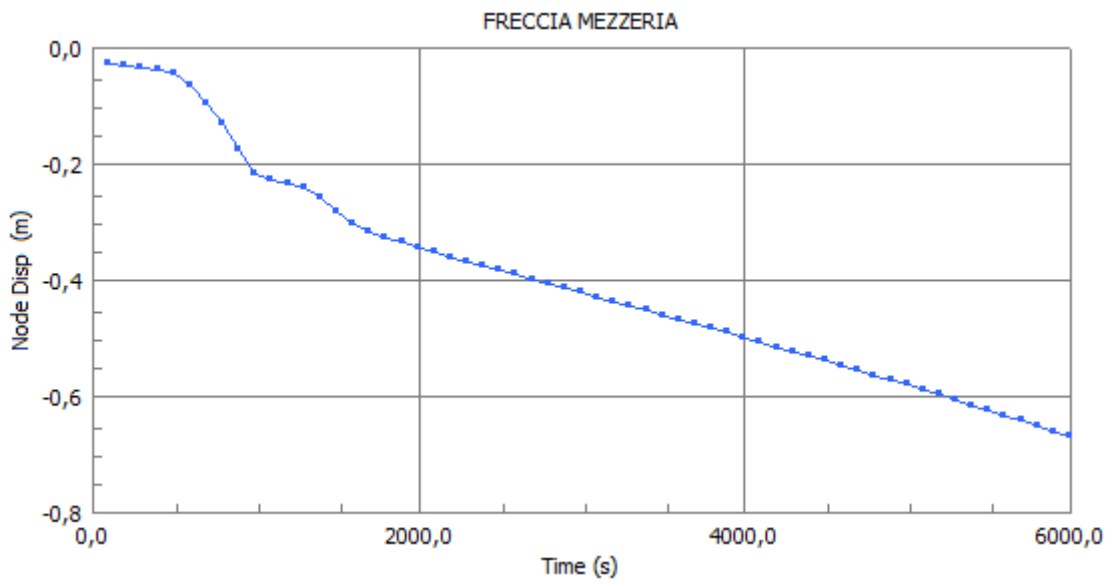


Figura 11.18-Spostamenti in mezzeria

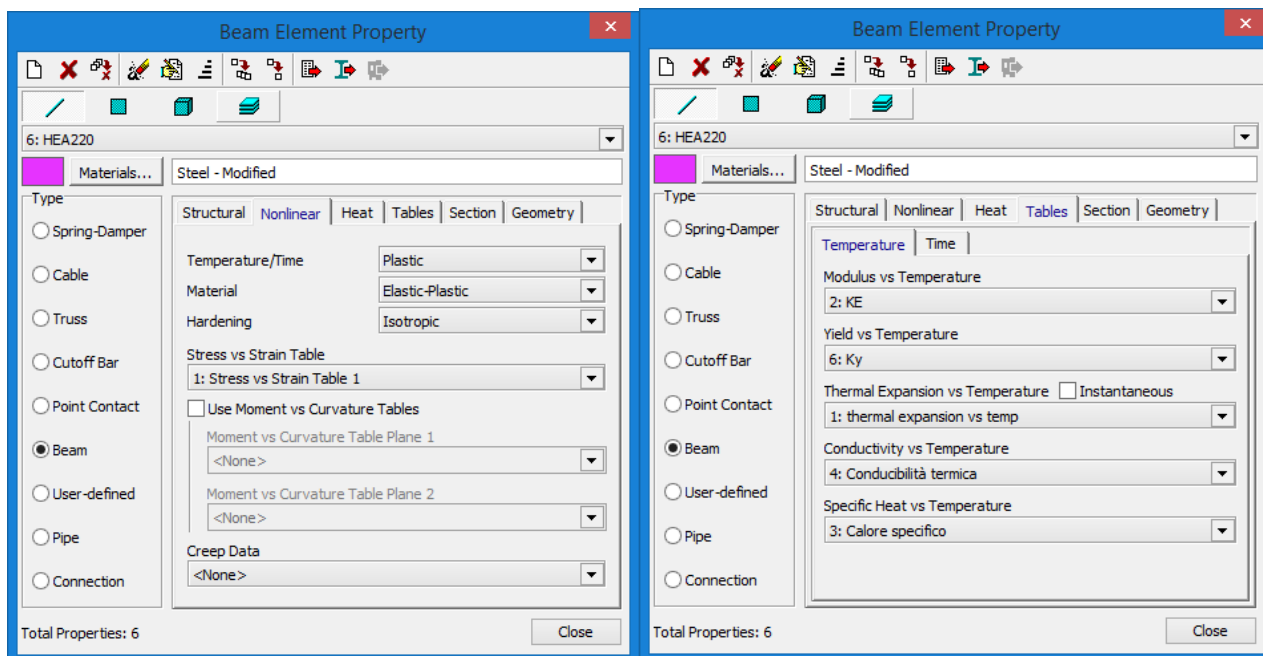
La soluzione ottenuta con metodo FEM è confrontata con quella ricavata analiticamente da:

$$w = \frac{5}{384} * \frac{(ql^4)}{E(T)I}$$

E(T); Ky=cost; Dila.=cost;NLG=cost		
t[s]	(m)	VERIFICA
100	-0,02556	0,00
200	-0,02840	0,00
300	-0,03195	0,00
400	-0,03651	0,00
500	-0,04259	0,00
600	-0,06553	0,00
700	-0,09465	0,00
800	-0,13451	0,00
900	-0,17038	0,01
1000	-0,21297	0,00
1100	-0,21512	0,01
1200	-0,23233	0,00

Si nota che la soluzione coincide con quella individuata per mezzo di STRAUS7.

CASO 3 – Variazione del modulo di Young, del limite di snervamento e dilatazione termica



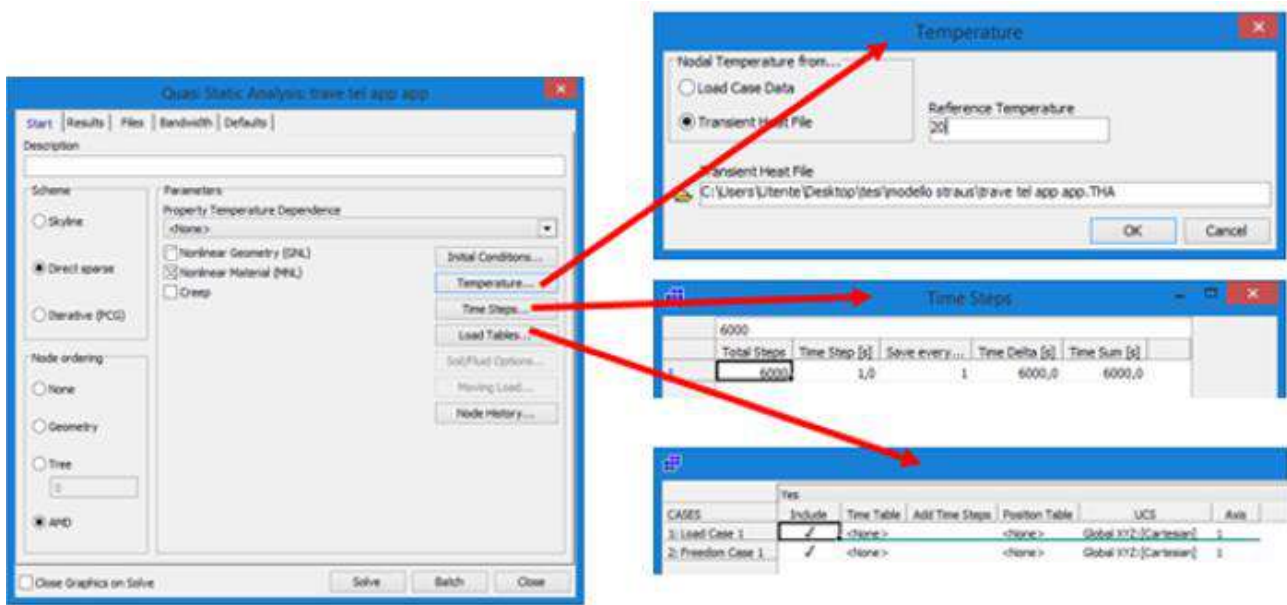


Figura 11.19-Settaggi Straus7

Si analizza la soluzione ottenuta.

Si studia lo spostamento del nodo in mezzeria n°2 rispetto al nodo all'appoggio n°3.

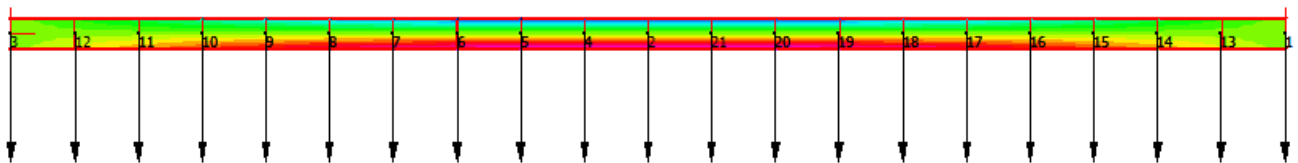


Figura 11.20-Andamento delle tensioni

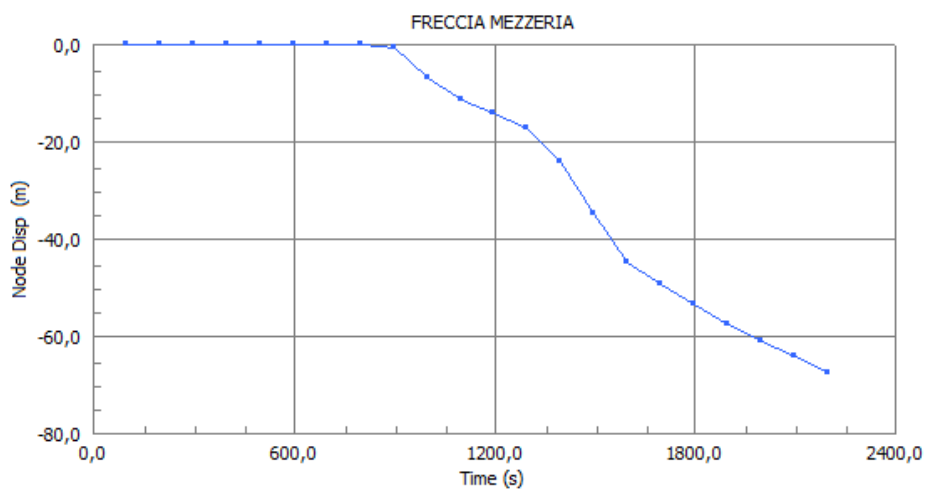


Figura 11.21-Spostamenti in mezzeria

Si notano spostamenti in direzione y di gran lunga maggiori rispetto ai casi precedenti, a causa del degrado della resistenza con le alte temperature.

Si confronta la soluzione FEM con quella analitica:

$$w = \frac{5}{384} * \frac{(ql(T)^4)}{E(T)I}$$

CASO 4 – Analisi con non linearità geometriche e meccaniche

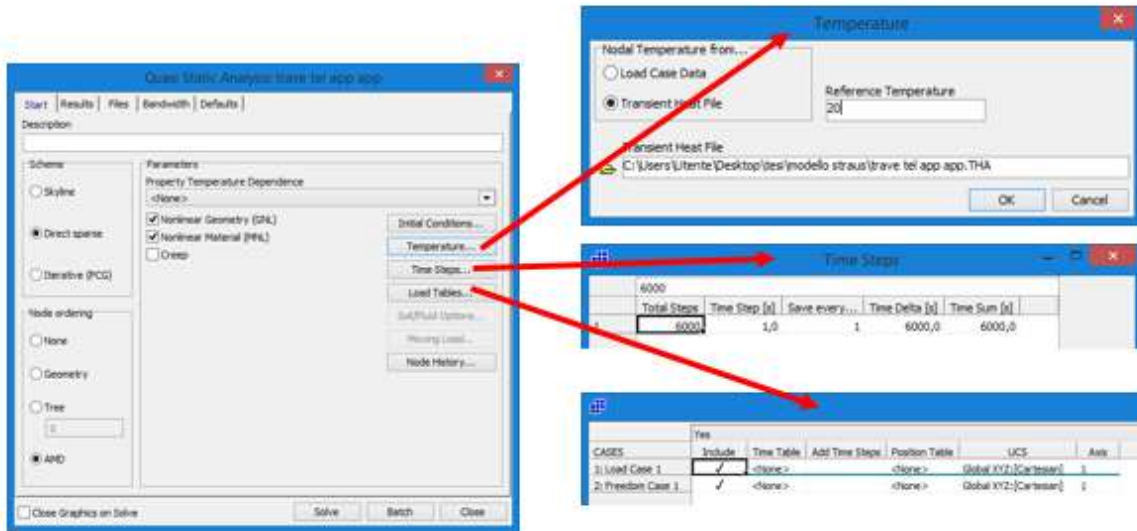


Figura 11.22-Settaggi Straus7

Si analizza la soluzione ottenuta.

Si studia lo spostamento del nodo in mezzeria n°2 rispetto al nodo all'appoggio n°3.

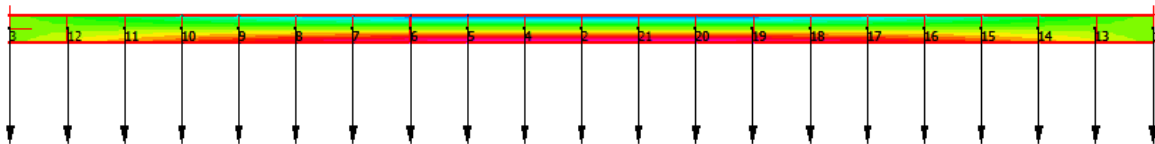


Figura 11.23-Andamento delle tensioni

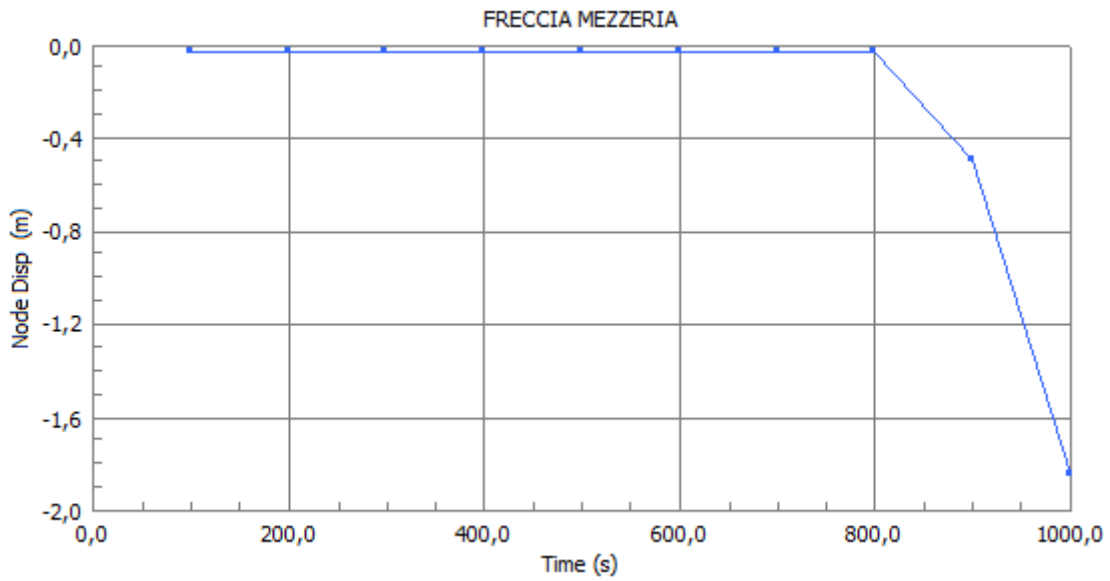
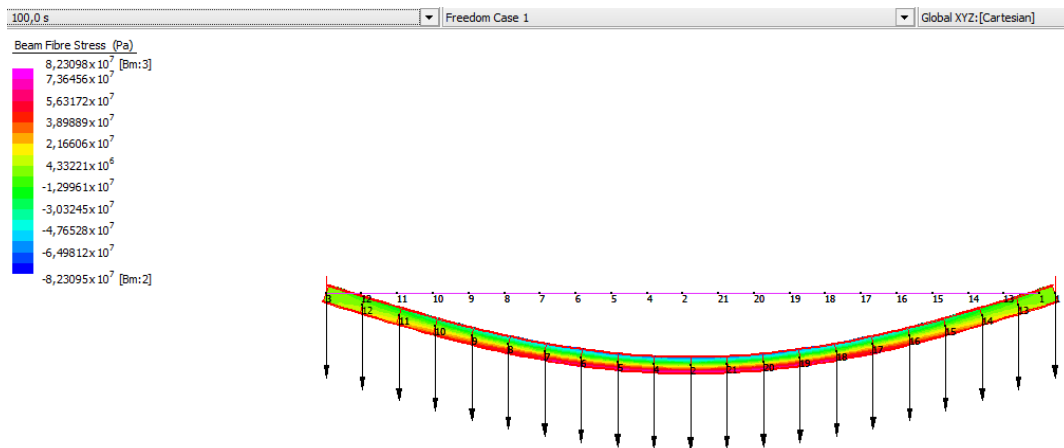


Figura 11.24-Freccia mezzeria

Si nota che la trave al tempo $t=1s$ è soggetta ai soli carichi gravitazionali, distribuiti uniformemente. Solo successivamente influisce l'effetto termico, che comporta un'espansione della trave con spostamento verso destra del carello pari a $\delta_{1000} = -0.823$ m.



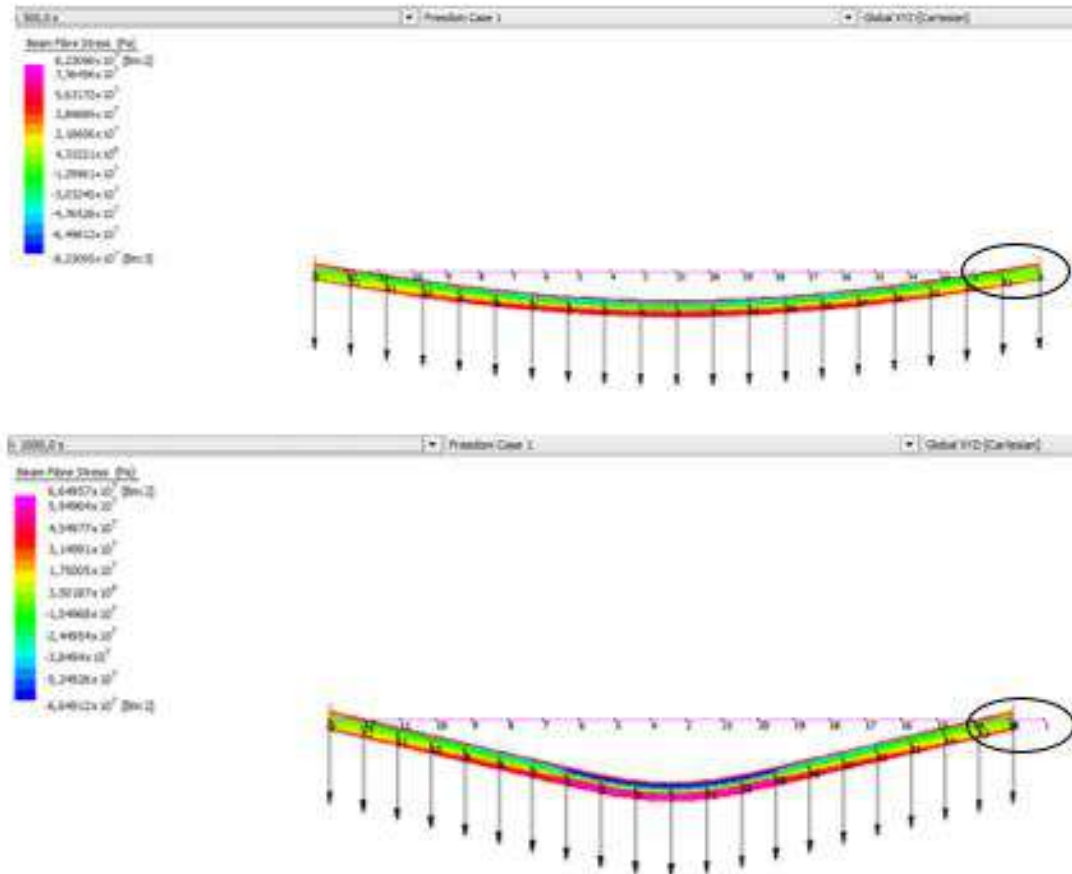


Figura 11.25-Bowing effect

Inoltre, si nota una diminuzione della freccia che passa da $w_{1-500} = 0.028\text{m}$ a $w_{1000} = 1.84\text{m}$.

Considerando il collasso convenzionale per superamento della deformazione limite pari a $L/30=0.2825\text{m}$, il collasso avviene a 900s ovvero a 15min. Tale arco di tempo è tipico delle strutture in acciaio non protette e soggette a carichi termici, derivanti dalla curva standard ISO834.

Il collasso, considerando tutte le fonti di non linearità, avviene alla temperatura critica di $T_{cr}=687^{\circ}\text{C}$.

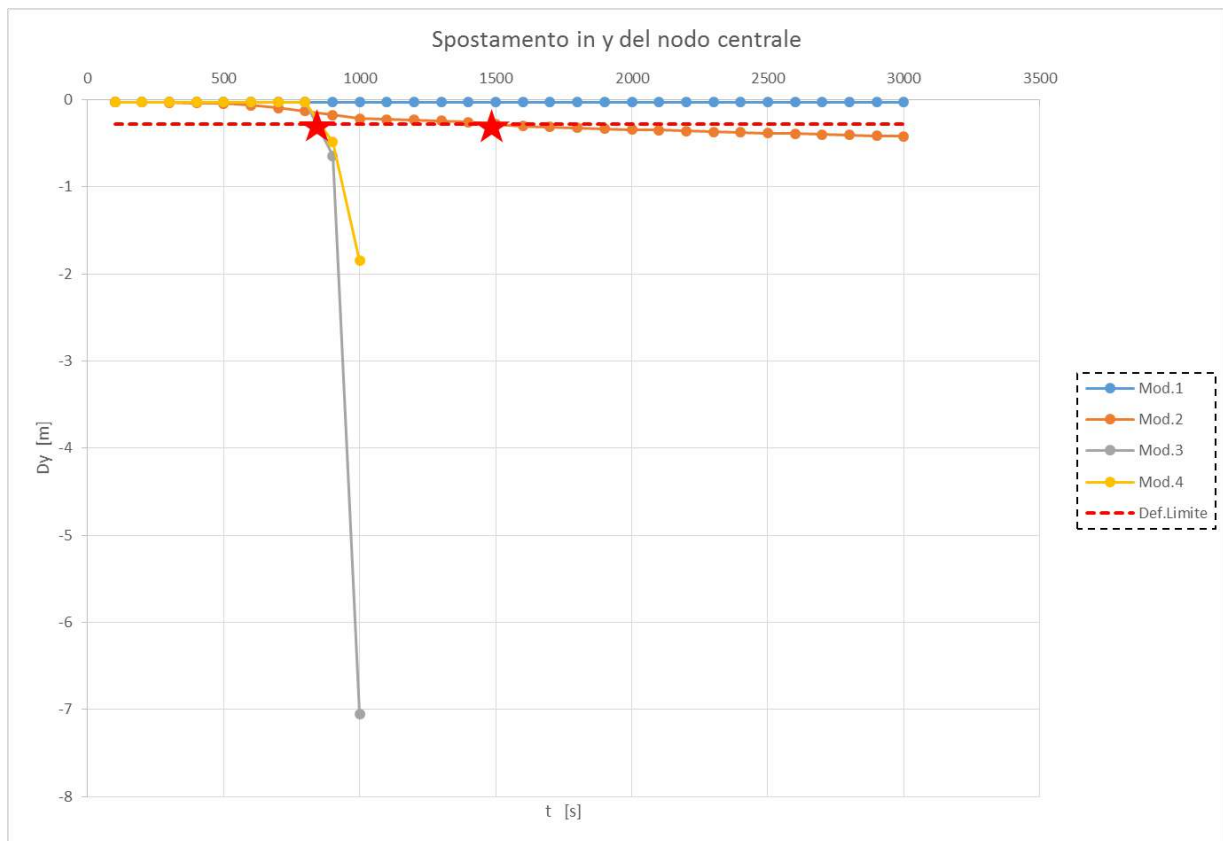


Figura 11.26-Collasso per deformazione limite

I risultati, ottenuti nelle quattro differenti analisi, evidenziano l'importanza di introdurre le non linearità all'interno del nostro modello. Infatti, nel primo caso, si ha una soluzione costante e inferiore alla deformazione limite per ogni t. Successivamente, considerando solo il modulo di Young, variabile con la temperatura T, si arriva a un valore di deformazione minore a quello limite per un tempo pari a t=25min. Inserendo le non linearità meccaniche e geometriche si è al di sotto della deformazione fino a t=15 min., perdendo un intervallo di tempo pari a 10 min.

Se ne deduce che per alcune particolari geometrie e condizioni al contorno, la non introduzione delle non linearità potrebbe portare a considerare la struttura come resistente per un periodo di tempo sufficiente ad esplicare le funzioni per il quale è stata progettata, quando in realtà ciò non è verificato tenendo conto anche delle non linearità.

Esaminando l'andamento della deformata, si ricade nel caso A, in cui avviene il bowing effect.

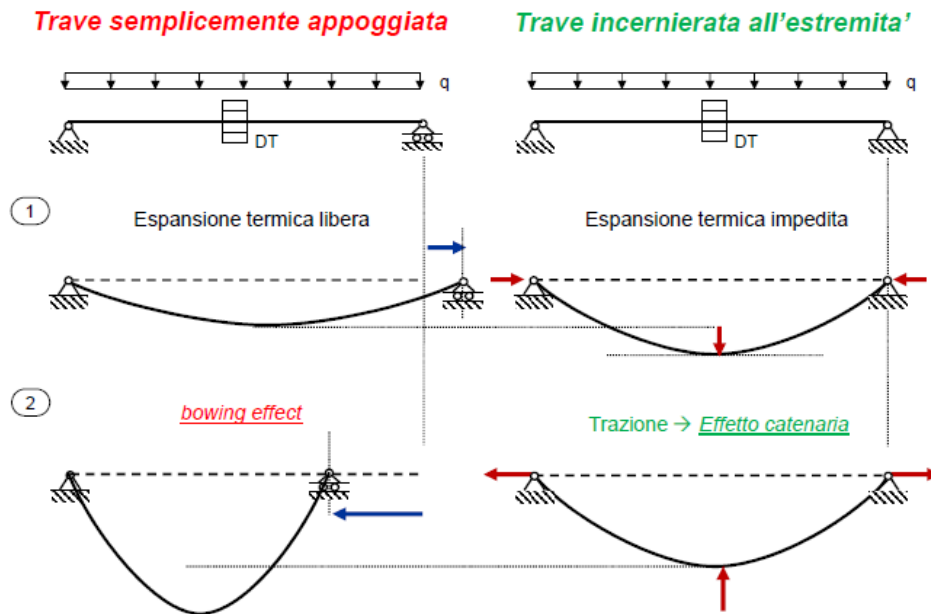


Figura 11.27-Bowing effect vs Effetto catenaria

La trave, dopo una prima espansione libera verso l'esterno, tende ad accorciarsi a causa della perdita di resistenza, causata da un aumento della temperatura, capace di provocare un decadimento del modulo di Young e del limite di snervamento.

Ora, si analizza il medesimo caso, ma cambiando i vincoli e considerando due cerniere all'estremità. In questo caso si avrà l'effetto catenaria.

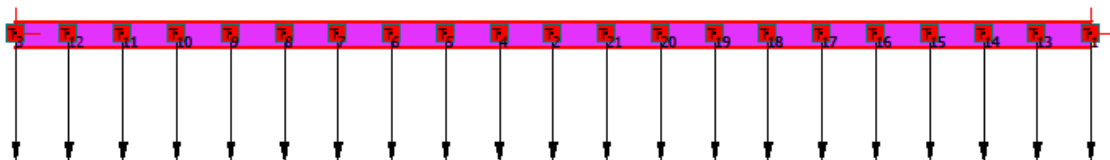


Figura 11.28-Discretizzazione trave appoggio-appoggio

Come si nota dallo schema, si attende un valore ai 500s della freccia che sia superiore rispetto al caso precedente: raggiunge, infatti, un valore di $w_{500} = 0.40$ m.

Successivamente ai 1000s, questo tende a diminuire a $w_{1000} = 0.57$ m, un valore minore rispetto al caso con vincoli cerniera-carrello.

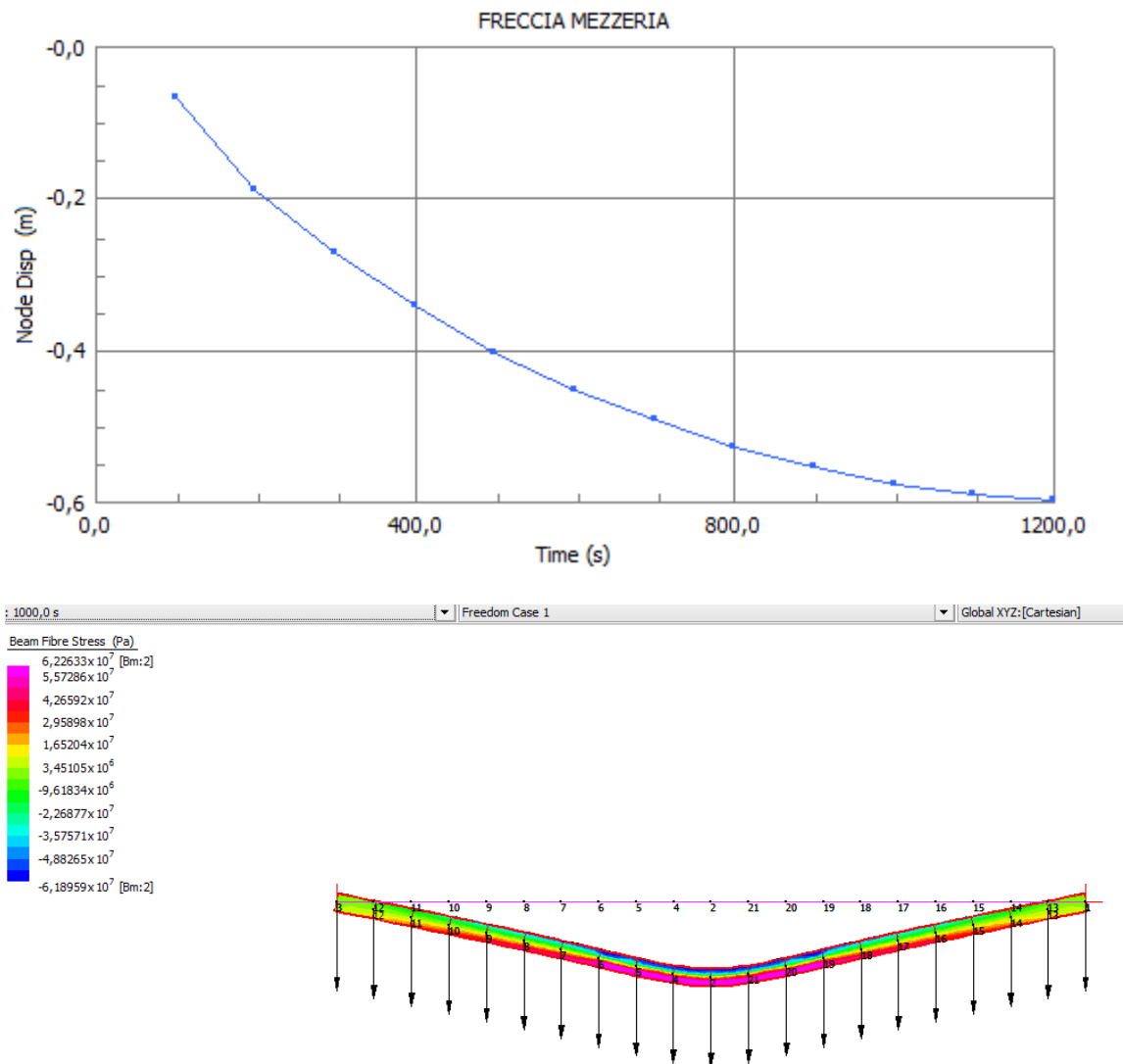


Figura 11.29-Freccia mezzeria e andamento delle tensioni

In quest'ultimo caso, si evidenziano problemi nelle connessioni, in quanto sono soggette a grandi valori di sforzo normale. Inizialmente, infatti, durante la fase di espansione impedita, si sviluppano valori di sforzo normale negativi, mentre, nella fase di ritiro, si sviluppa uno sforzo normale di compressione e le connessioni sono sollecitate a trazione.

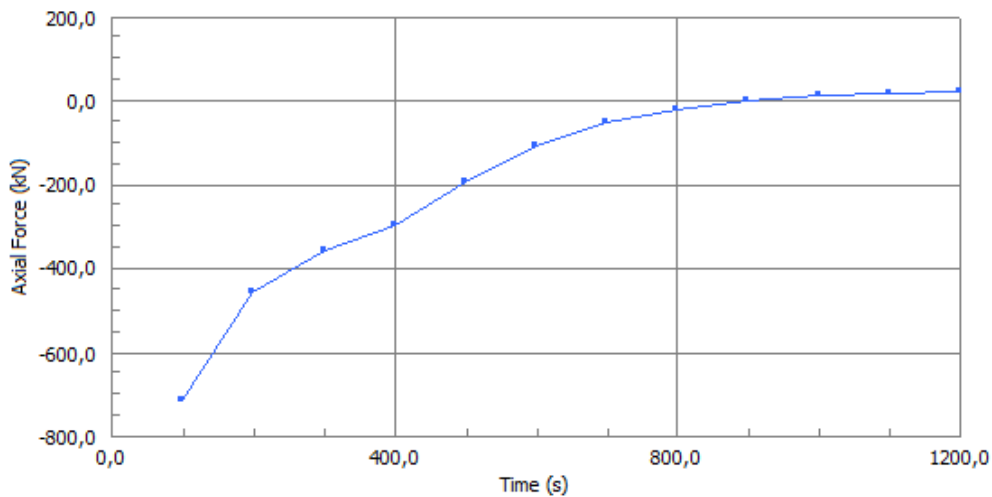


Figura 11.30-Sforzo assiale

Durante la progettazione della struttura nella sua globalità incontreremo una situazione intermedia tra le due precedentemente descritte, a causa delle diverse rigidità dei nodi.

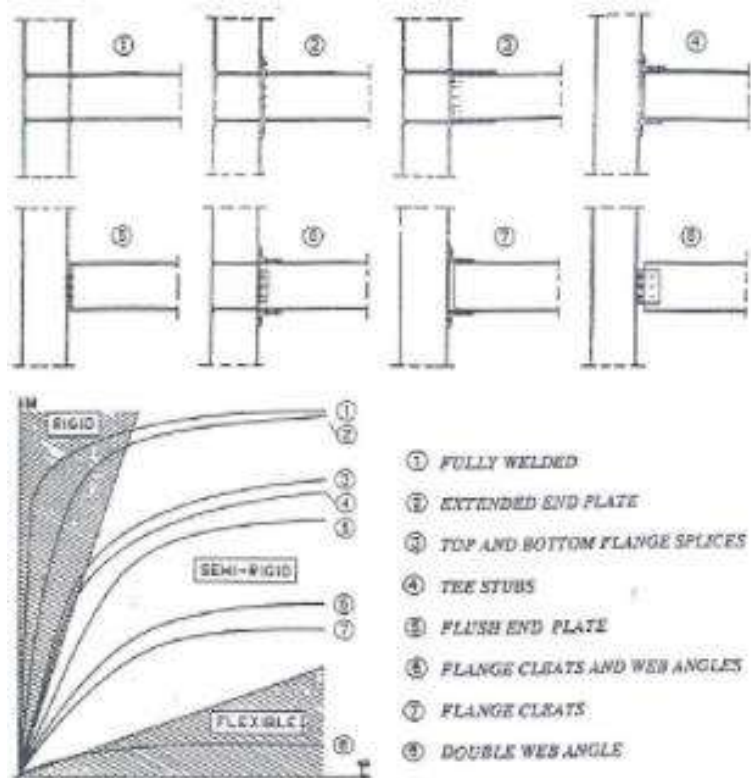


Figura 11.31-Classificazione dei nodi trave colonna in funzione della rigidità

12 THERMAL BUCKLING

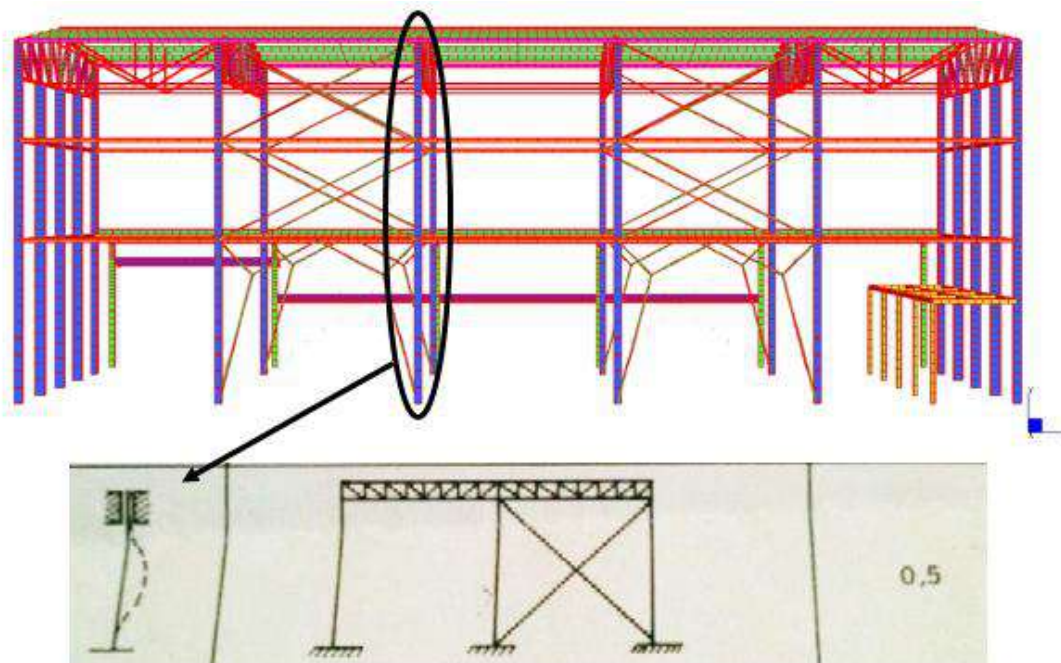
Di seguito, si analizza tramite FEM il fenomeno del Thermal Buckling.



Con carico concentrato in punta pari a 35Kn, a cui si aggiunge un ulteriore carico dato dal proprio peso pari a 13Kn, si ottiene un totale di 48kN, conseguendo un moltiplicatore critico pari a 81,32. Questo valore sarà utilizzato come soluzione di riferimento.

Soluzione di riferimento		
L=L0	7,5	m
Imin	0,000108	m ⁴
A	0,0212	m ²
F	48	kN
E	2,06E+11	Pa
Pcr	3903,63	kN
BLF	81,32554026	

Ora, si prosegue con l'analisi FEM, isolando l'elemento e considerando il vincolo in figura.



Si esegue un'analisi statica per ottenere il file di input per l'analisi di buckling.

	MIN	MAX
AxForce(kN)	-59,5099	-35,0
	[Bm: 2]	[Bm: 1]



Si esegue un'analisi di Buckling, ottenendo i moltiplicatori critici da confrontare con la soluzione di riferimento.

```

Linear Buckling Log:C:\Users\Utente\Desktop\tesi\modello straus\BUCKLING GIUSTO.L...
Relative Difference [Converged: 4]
1.21521E-15 4.78238E-13 4.54306E-08 3.04836E-06 2.04069E-05 1.63047E-03
1.45447E-03 2.16197E-02 8.76325E-02 1.33951E-01

ITERATION 8
Current Buckling Load Factors
8.18592E+01 1.66880E+02 3.25058E+02 4.86317E+02 7.15786E+02 9.44603E+02
1.23587E+03 1.52814E+03 1.98405E+03 3.16910E+03
Relative Difference [Converged: 4]
1.04161E-15 1.19219E-15 5.75987E-10 8.32585E-08 7.66317E-07 2.04231E-04
3.93504E-04 7.49918E-03 4.27458E-02 8.58887E-02 |

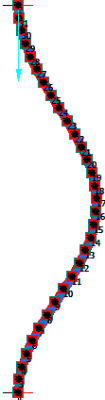
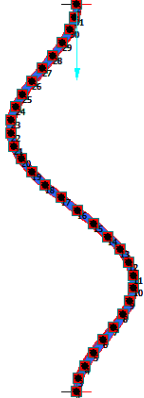
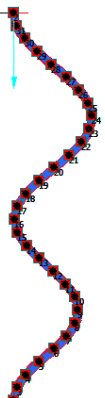
THE FIRST 4 EIGENVALUES HAVE CONVERGED

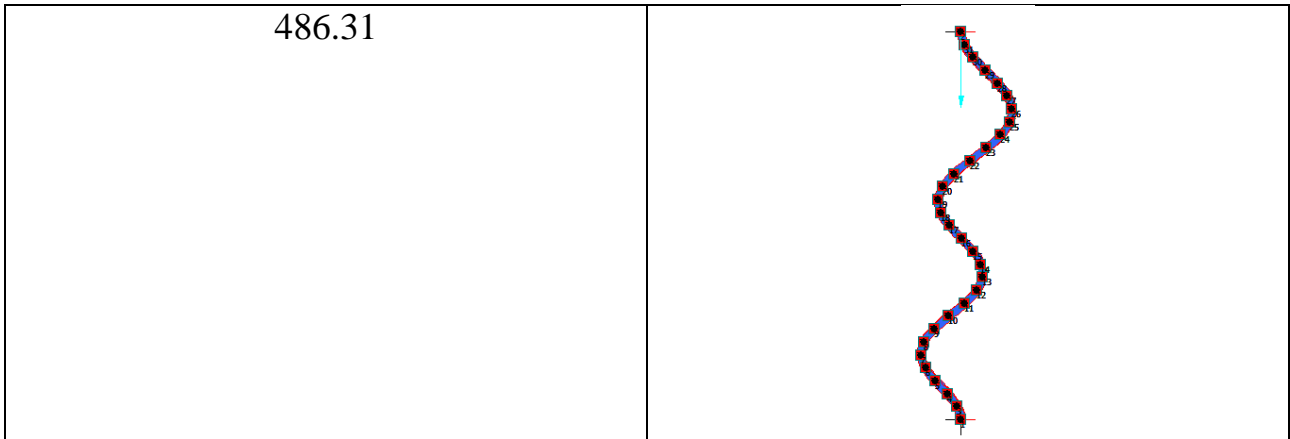
FINAL BUCKLING RESULTS
CALCULATED BUCKLING LOAD FACTORS
1      8.18591815E+01
2      1.66879631E+02
3      3.25057587E+02
4      4.86317197E+02

TOTAL CPU TIME           : 1.172 Seconds ( 0:00:01)

Solution completed on 02/09/2017 at 20:08:33
Solution time: 1 Second

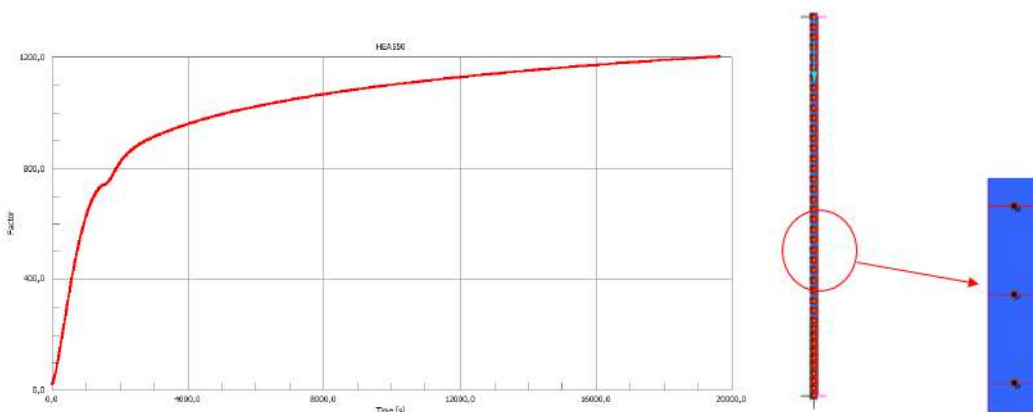
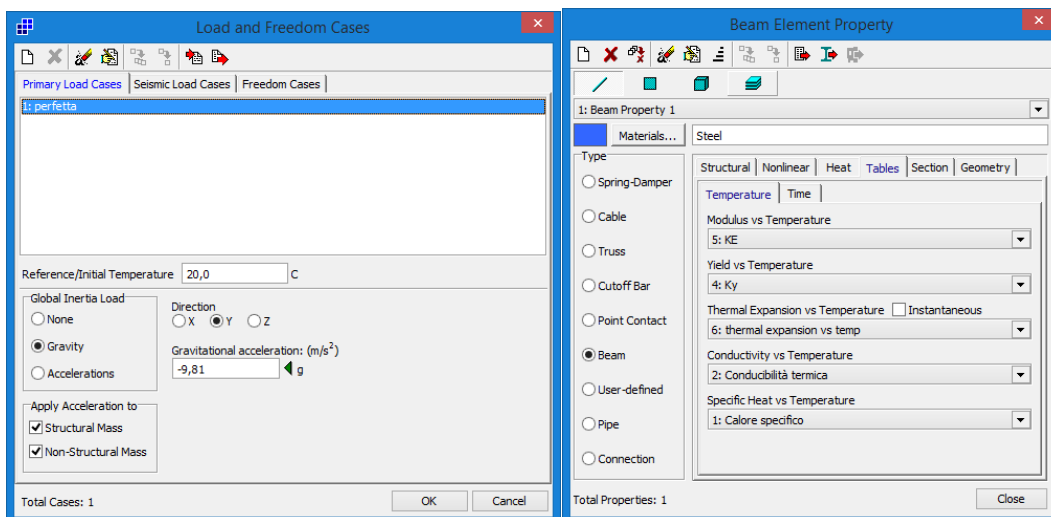
5.469 bytes 141 lines
    
```

Modo	
81.85	
166.87	
325.05	

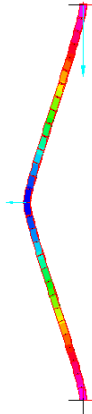


Ora, si esegue prima un'analisi termica transiente non lineare e dopo si studia l'equilibrio con un'analisi quasi statica.

S' impostano le seguenti condizioni al contorno e la curva di riscaldamento per profili HEA550 ai diversi nodi di cui la colonna risulta discretizzata.



Eseguita l'analisi termica transiente, si lancia l'analisi quasi statica, utilizzando i risultati precedenti come dati di input su cui far variare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio S275, si nota che la membratura con applicata un'imperfezione tende a sciogliersi verso l'esterno ad un tempo pari a 453[s].



13 VERIFICHE DI SOTTOSTRUTTURE SOGGETTE A CARICO DI INCENDIO

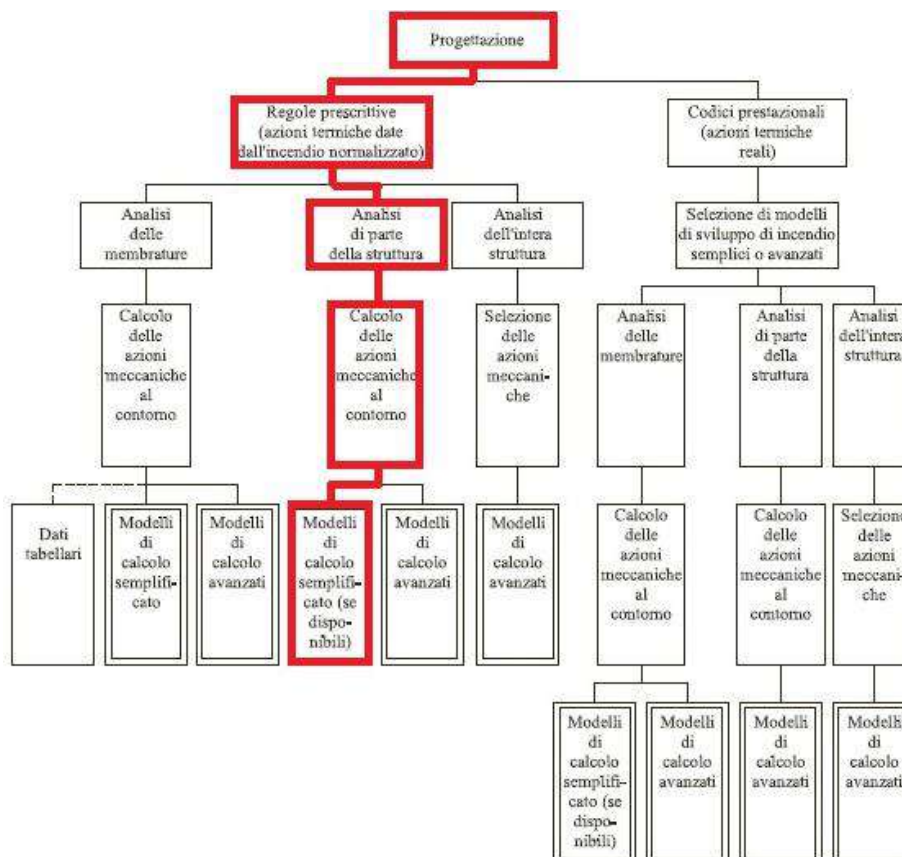


Figura 13.1-Percorso di progettazione

Per calcolare la resistenza al fuoco dei telai complessi con alcune parti della struttura, alle volte non inserite nel compartimento dell'incendio, si giunge ad un calcolo molto complesso, che richiede l'applicazione di idonei metodi di calcolo.

Le modalità del collasso, causato dal riscaldamento, possono coinvolgere anche dei meccanismi locali: si è, dunque, in grado di analizzare come se i vari elementi strutturali fossero isolati gli uni dagli altri. Alcuni casi ragguardevoli, comunque, non sono risolvibili non contando l'effetto della plasticizzazione ai danni della stabilità. Oltretutto, l'iterazione è tipica dei telai industriali ad un solo piano e di quelle costruzioni in cui la stabilità è assicurata dalla rigidità delle stesse colonne.

13.1 PRINCIPIO DI RANKINE - MARCHANT

In tali casi, si è in grado di ricavare una stima abbastanza precisa per quanto riguarda la temperatura critica, applicando un'appropriata estensione del principio di Rankine-Marchant, come si può osservare in Toh et Al. 2001.

Il principio di Rankine-Marchant collega il coefficiente di sicurezza Λ_c proprio della struttura effettiva, con quelli che si possono ottenere utilizzando delle semplici analisi che dividono il problema in due:

- Il calcolo limite per mezzo del moltiplicatore di collasso con formazione di un meccanismo di tipo plastico Λ_p ;
- La determinazione del limite di stabilità elastica proprio della struttura Λ_e .

Inoltre, si definisce il presente legame fra i tre margini di sicurezza:

$$\frac{1}{\Lambda_{cr}} = \frac{1}{\Lambda_p} + \frac{1}{\Lambda_e}$$

Nell'analisi antincendio, i coefficienti si considerano come funzioni decrescenti al variare della temperatura, mentre la condizione critica $\Lambda_{cr} = 1$ permette di ricavare la temperatura di collasso.

Tale metodologia è stata esaminata da parte di Toh et al. (2001), sia per mezzo di casi sperimentali di confronto, sia realizzando una serie di confronti con le soluzioni agli elementi finiti. Si ritrova un'accuratissima precisione, tenuto conto della complessità del problema riguardo la stabilità termo-meccanica, evidenziando come nella formula di combinazione vi siano dei margini di errore minori del 10%.

La formula verrà applicata per computare dettagliatamente la temperatura critica di un telaio a nodi spostabili, per cui Toh ha esaminato il percorso d'equilibrio. Il metodo,

dunque, si dimostra facile nell'applicarsi, seppur includendo gran cautela nell'individuare le condizioni limite da attivare.

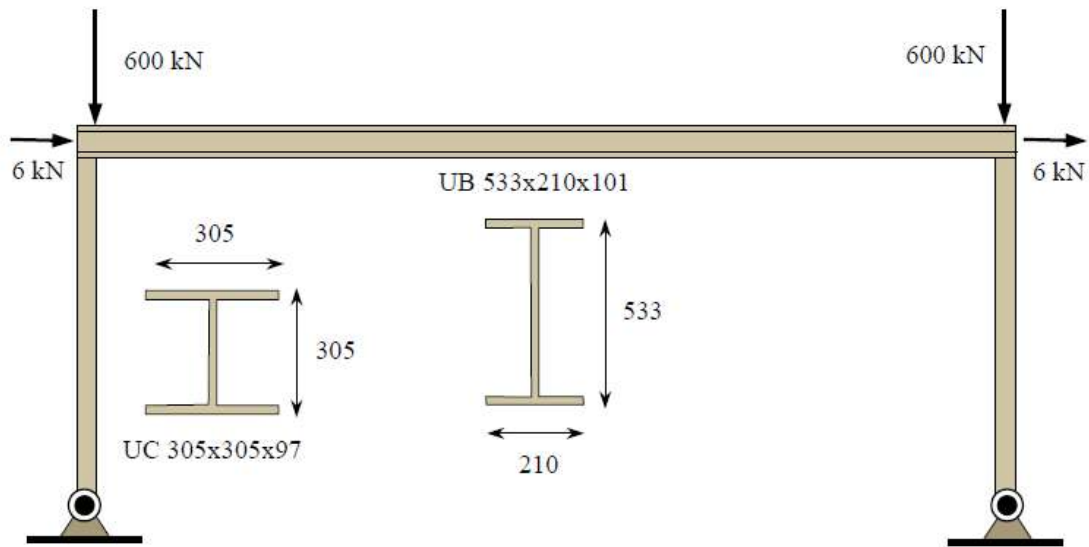


Figura 13.2-Telaio

Trave	J_z	W_{el}	W_{pl}	i_{max}	A	f_y	t_f	t_w
UB 533x210x101	61520	2292	2612	21,9	128,7	4600	17,4	10,8
UC 305x305x97	22250	1445	1592	13,42	123,4	4600	15,4	9,9
	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	kg/cm ²	mm	mm

Considerando il telaio proposto dalla figura, per cui è ipotizzato un crescente riscaldamento di tipo uniforme di tutte le sezioni, si possono apprezzare le principali proprietà all'interno della tabella.

La resistenza a presso flessione appartenente alle sezioni è schematizzata per mezzo di una relazione del tipo lineare:

$$\frac{1}{M_p} = 1 - \frac{N}{N_u}$$

In cui il valore appartenente a N_u , nel momento in cui non vi è alcun tipo di problema riguardante la stabilità, si pone uguale allo sforzo di snervamento N_p , altrimenti, in presenza di eventuali mancanze della stabilità all'equilibrio, a quello critico N_{crE} . Il momento plastico si può considerare uguale al modulo plastico della resistenza W_p per la tensione di snervamento f_y .

Questo valore può variare per considerare il taglio, come viene mostrato in Pozzati e Ceccoli (vol. III.1, 1987).

Il computo delle sollecitazioni, prodotte dalle forze dentro il telaio, è semplice e riporta:

$$M_S = H * L; \quad N_S = V$$

Il margine di sicurezza rispetto alla plasticizzazione delle sezioni è calcolato rispetto alla formazione di un meccanismo labile.

Nel caso in questione, si può intendere come la struttura si trasformi in meccanismo per la formazione di una coppia di cerniere nelle sezioni all'apice delle colonne.

Il margine di sicurezza nei confronti della plasticizzazione delle sezioni deve essere calcolato in relazione alla formazione di un meccanismo labile; nel caso in esame è semplice comprendere che la struttura si trasforma in meccanismo per formazione di due cerniere nelle sezioni di sommità delle colonne.

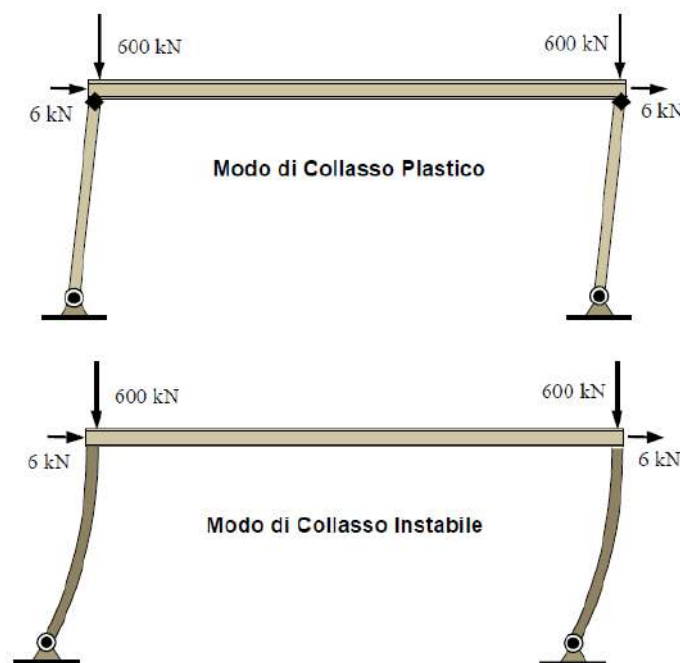


Figura 13.3 Modi di collasso

Il calcolo, per quanto attinente al modo di tipo instabile, si può condurre, senza apprezzabili errori, con riferimento all'instabilità per svio orizzontale della travata alla

presenza di rotazioni pari a zero della stessa. La lunghezza libera delle colonne è, per tale motivo, definita a due volte l'altezza del telaio.

Possono essere scritte, dunque, le formule d'interazione delle sezioni critiche, rendendo esplicito il ruolo della temperatura nella diminuzione dei fattori legati alla sicurezza.

Per quanto riguarda la valutazione del carico critico, si fa affidamento alle formule precedentemente citate, anche se il fattore sotto la radice quadra della formula è ignoto, poiché funzione della temperatura critica incognita propria del problema in questione.

Esaminando il rapporto $k_y(T)/k_E(T)$, s'individua un valore poco variabile, per cui la sua radice varia pochissimo. Al fine di semplificare a metodologia di calcolo, si assume un fattore per amplificare la snellezza equivalente a 1.2, idoneo per un gran numero di temperature al di sopra dei 400°C.

Infine, sono ottenute le presenti relazioni:

Si ottengono infine le seguenti relazioni:

$$M_{R,fi,0} = W_p f_y = 2.612 * 460 = 1201.5 kNm, \quad N_{R,fi,0} = A * f_y \\ = 12340 * 460 * 10^{-3} = 5676 kN$$

Per ciò che concerne il carico critico:

$$\bar{\lambda} = 1.2 * \frac{L}{i} \sqrt{\frac{f_{yd}}{\pi^2 E}} = 1.2 * \frac{2 * 5370}{132.4} \sqrt{\frac{460}{\pi^2 205000}} = 1.468$$

Ottenendo:

$$\chi = 0.258, \quad N_{cr,fi,0} = \chi * N_{R,fi,0} = 1464.4 kN$$

Le relazioni sulla diminuzione del coefficiente di sicurezza con la temperatura riguardano:

- La formazione del meccanismo;
- La perdita di stabilità.

$$\gamma_P = \frac{M_{R,fi,0}}{M_{S,fi}} k_y(\theta_{cr}) \left(1 - \frac{N_{S,fi}}{N_{R,fi,0} * k_y(\theta_{cr})} \right) = 37.29(k_y(\theta_{cr}) - 0.106),$$

$$\gamma_e = \frac{N_{cr,fi,0}}{N_{S,fi}} k_y(\theta_{cr}) \left(1 - \frac{M_{S,fi}}{M_{R,fi,0} * k_y(\theta_{cr})} \right) = 2.44(k_y(\theta_{cr}) - 0.0268),$$

Per risolvere la temperatura critica, è necessario soddisfare il principio di Rankine Marchant:

$$\frac{1}{\gamma_p} + \frac{1}{\gamma_e} = 1$$

In tal modo, sono ottenuti i presenti valori:

- $\theta_p = 781$ °C, relativamente al caso della sola relazione plastica;
- $\theta_e = 613$ °C, relativamente al caso del solo carico attivo;
- $\theta_{cr} = 589$ °C, ottenuto tramite la formula di composizione e non distante dal valore numerico di 598 °C, il quale è stato delineato con un'analisi non lineare incrementale iterativa.

Si ottengono i seguenti valori: per il caso della sola relazione plastica, $\theta_p = 781$ °C, per il caso del solo carico critico si ricava $\theta_e = 613$ °C, e infine, forzando la formula di composizione si ottiene $\theta_{cr} = 589$ °C, che risulta assai prossima al valore numerico di 598 °C determinato con una analisi non lineare incrementale iterativa.

14 MECCANISMI GLOBALI DELLA STRUTTURA SOGGETTE A CARICO DI INCENDIO

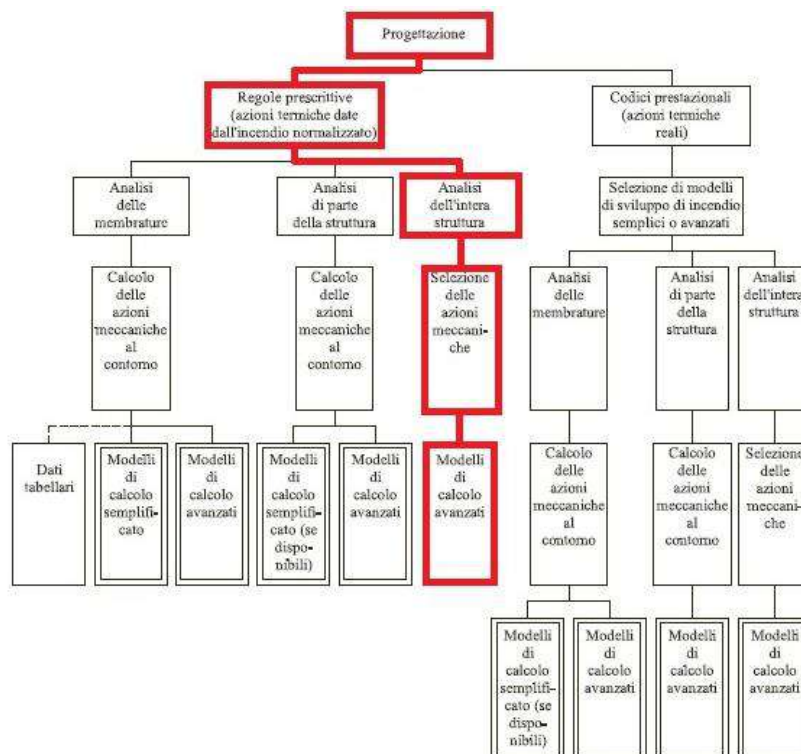


Figura 14.1 Percorso progettuale

La trattazione precedente ha trattato i singoli elementi e parti di struttura. Questa sezione descrive come il comportamento strutturale di un elemento esposto al fuoco possa risultare migliore per effetto dell'appartenenza ad un insieme strutturale.

14.1 IPERSTATICITÀ

I metodi semplificati, descritti in precedenza, non sono utili per progettare in maniera idonea gli edifici in acciaio oppure ragguardevoli sottostrutture metalliche che ne fanno parte. È necessario, dunque, l'utilizzo del metodo "generale", presente nell'Eurocodice 3 attraverso l'impiego di opportuni programmi di calcolo ai fini di un'analisi delle strutture vittime d'incendio. Questi programmi possono delineare lo stato di sollecitazione in ogni singola membratura, considerando, come indicato, l'effetto conseguente alle deformazioni termiche, viscoso e meccaniche. L'applicazione del metodo generale è fondamentale per ogni struttura con grandi spostamenti. Il computo della resistenza all'incendio di un elemento e dei terminali in acciaio strutturale, comporta vari risultati se si prende l'elemento in questione come parte di una struttura e non come elemento a sé. Solitamente, la resistenza al fuoco è migliore quando l'elemento è preso in considerazione come parte di una struttura, dal momento che è possibile prendere in conto le risorse della resistenza, le quali possono essere ricondotte ai meccanismi attivati con le grandi deformazioni e all'iperstaticità.

Il comportamento dei telai resistenti a flessione risulta maggiormente complicato rispetto a quello proprio di ogni elemento, quali pilastri e travi, conseguentemente alla continuità esistente fra elementi tra loro adiacenti, ma anche rispetto ai vincoli assiali e all'influenza che le deformazioni degli elementi direttamente esposti al fuoco possiedono sugli altri elementi, sia essi vicini che lontani, che non aumentano la propria temperatura. La figura, ad esempio, evidenzia le deformazioni ottenute per un edificio a più piani, sottoposto ad un incendio scaturito al pian terreno. Solitamente, la continuità a flessione incrementa la resistenza al fuoco di ogni elemento appartenente al telaio, tanto che la progettazione di ogni singolo elemento per mezzo dell'applicazione delle metodologie precedentemente descritte, risulta a favore della sicurezza.

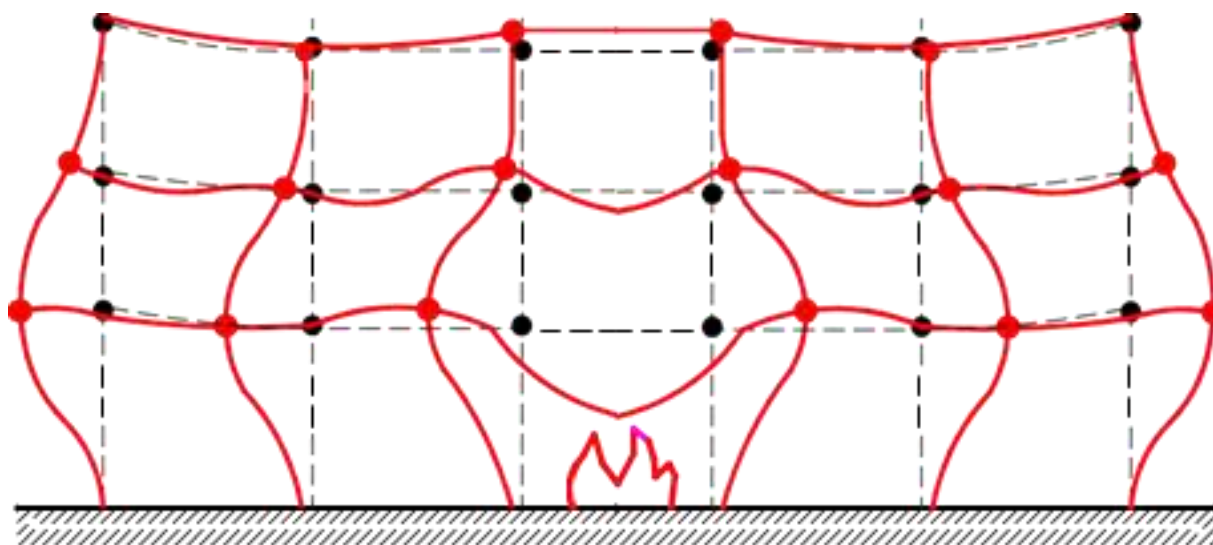


Figura 14.2-Telaio soggetto ad incendio localizzato

La progettazione all'incendio di strutture grandi oppure speciali, come quelle aventi telai multipli, sia spaziali che piani, generalmente ha bisogno dell'uso di opportuni codici di calcolo, soprattutto se si tratta di telai non controventati, poiché si deve tener conto degli effetti del secondo ordine.

Un gran numero di strutture mostra un basso livello di *iperstaticità* e, dunque, il collasso di un elemento è in grado di portare al collasso della struttura nel suo insieme. Viceversa, per quanto riguarda le strutture molteplicemente *iperstatiche*, esse possiedono una ragguardevole redistribuzione del carico, tanto che, al cedere di un elemento, si verifica la trasmissione dei suoi carichi agli altri elementi resistenti e maggiormente rigidi. Tale evento è raffrontabile, dal punto di vista concettuale, con la redistribuzione dei momenti nel singolo elemento della struttura, seppur trattandosi, in questo caso, di una redistribuzione dei carichi da un elemento all'altro. Tanto più grande è il livello di iperstaticità, tanto più sono numerosi i vari percorsi di tipo alternativo per la redistribuzione del carico. Oltretutto, conseguentemente a ciò, l'improbabilità del collasso di tutto l'edificio diviene maggiore se esposto ad un incendio localizzato, capace di provocare il collasso di uno o più elementi della struttura.

Il grado d'utilizzo e l'iperstaticità sono legati, poiché, nel momento in cui i carichi totali che agiscono su di una struttura durante l'incendio sono minori rispetto al carico di progetto, dunque si ha un basso rapporto d'utilizzo, una minore iperstaticità è sufficiente, a patto che vi siano abbastanza percorsi alternativi per una redistribuzione dei carichi ai diversi elementi non danneggiati da parte dell'incendio.

L'iperstaticità è sempre tenuta in conto come vantaggiosa ai fini della progettazione strutturale all'incendio, ma, mentre per le costruzioni realizzate in calcestruzzo si ha

un'iperstaticità correlata alla loro monoliticità, in questo caso l'iperstaticità deve essere progettata con un parsimonioso progetto dei collegamenti fra i vari elementi.

Per quanto riguarda le strutture considerevolmente iperstatiche che sono esposte all'incendio, quindi aventi una gran numero di percorsi alternativi ai fini della redistribuzione dei carichi, come per i moderni edifici a più piani aventi una struttura in acciaio, il sopraggiungere d'importanti deformazioni non comporta notevoli lacune di capacità portante, a patto che la struttura abbia una duttilità idonea al fine di adattarsi a tali ragguardevoli deformazioni. Per tale motivo, in simili edifici non ha significato delineare il collasso come una sproporzionata deformazione di un qualsiasi elemento strutturale oppure come una perdita di capacità portante

14.2 COLLASSO A CATENA

Il collasso a catena, oppure non controllabile, è del tutto opposto, dal punto di vista concettuale, al collasso in presenza di un'iperstaticità della struttura: mentre la struttura iperstatica è in grado di resistere al collasso di una o più parti che la compongono, le strutture del tipo isostatico, oppure aventi parti isostatiche, sono sensibili al collasso con una serie di conseguenze a catena, ovvero incontrollabili, tanto da considerarsi più pericolose delle conseguenze dirette provocate dall'evento principale, ovvero si hanno delle conseguenze di gran lunga superiori a quelle della causa che li ha generati. Al fine di far fronte ad una simile tipologia di collasso, il progettista considera una data **robustezza** della struttura con una serie di percorsi alternativi per ciò che concerne i carichi nell'eventualità del collasso di uno o diversi elementi strutturali.

Il collasso a catena è in grado di aver luogo alla presenza di vincoli laterali a colonne e a travi, nel caso in cui gli elementi che assicurano il vincolo laterale vengano distrutti a causa dell'incendio e siano capaci di permettere un collasso dell'elemento principale.

14.3 EDIFICI MONOPIANO

Una tipologia molto frequente di costruzione realizzata in acciaio è quella delle strutture monopiano a portale, largamente applicate negli edifici di stampo industriale, come in quello evidenziato in figura. Attualmente, vi è un grande dibattito riguardo le strategie e gli obiettivi ai fini della progettazione contro il fuoco di simili edifici. Solitamente, queste costruzioni mostrano telai a portale, posti ad interasse da 5 a 10 m, con presenza di luci da 20 a 50 m, ma anche più se sono presenti delle colonne interne. Generalmente, le coperture possiedono una pendenza che si aggira fra i 2° e i 15°. Esse sono realizzate con lucernari in plastica traslucida e con lamiere sottili in acciaio. Altre tipologie di copertura sono quelle effettuate con i pannelli a sandwich, in grado di coprire luci più grandi, oppure con una lamiera ondulata. Le pareti appartenenti agli

edifici monopiano sono per lo più realizzate con mattoni, pannelli o muratura entrambi in calcestruzzo, che possono essere a piè d'opera oppure precedentemente fabbricate nello stabilimento. In quest'ultima eventualità, in cantiere si gettano i pannelli in modo diretto sulla platea, prima che vengano sollevati e messi a lavoro. Le pareti laterali di alcuni edifici, inoltre, sono fabbricate in calcestruzzo e possiedono una funzione portante, perciò sono assenti le colonne in acciaio e le pareti diventano appoggio flessionale e verticale alle strutture di copertura.

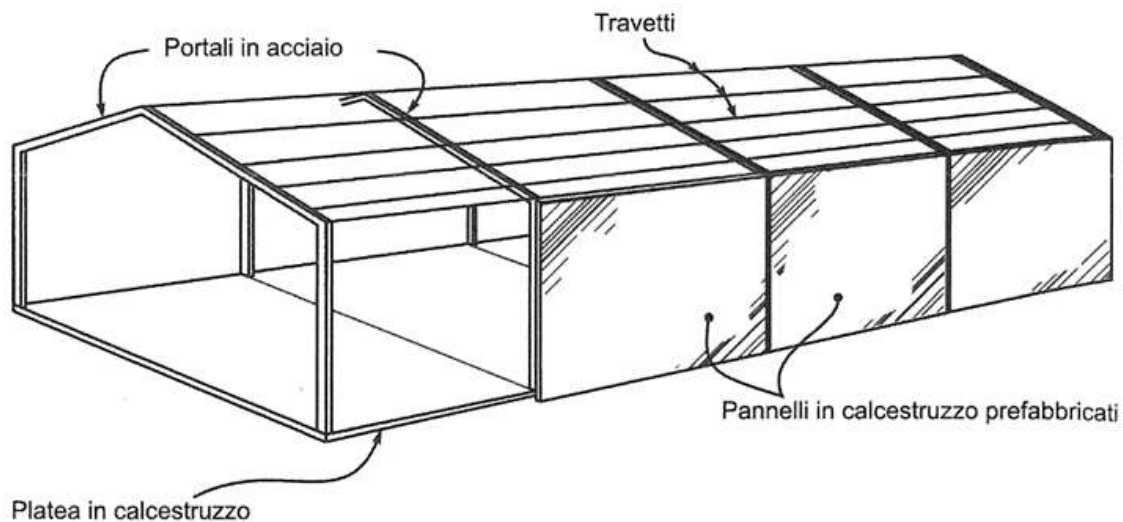


Figura 14.3-Edificio in acciaio monopiano

La potenza termica rilasciata nell'eventualità di un incendio di tipo incontrollato all'interno di un edificio industriale ad un solo piano è riportata nella figura, in cui l'incendio è inizialmente delimitato dalla ventilazione disponibile, per poi essere controllato dal materiale infiammabile dopo la fusione dei lucernari e il collasso del tetto. Poche volte, la struttura metallica utilizzata come copertura è protetta contro il fuoco, tanto che è solita collassare durante un incendio totalmente sviluppato. La superficie su cui avviene il totale sviluppo dell'incendio, dunque la superficie di collasso del tetto, inizierà ad espandersi nell'edificio con il propagarsi dell'incendio. Nel caso in cui i travetti che si occupano di sostenere la copertura siano di legno, allora è molto probabile che la copertura cada sui materiali in fiamme prima ancora che si verifichi il collasso delle travi principali. Per quanto concerne i travetti in acciaio, essi si deformano, prendendo forma a catenaria con sollecitazione di trazione, sostenendo in tal modo la copertura tra le travi, causata dal fondersi dei lucernari realizzati in plastica oppure delle lastre di copertura fabbricate in alluminio, implicando delle temperature più basse, poiché larga parte del calore sprigionato dalle fiamme viene liberato nell'atmosfera senza aumentare la temperatura della struttura in metallo.

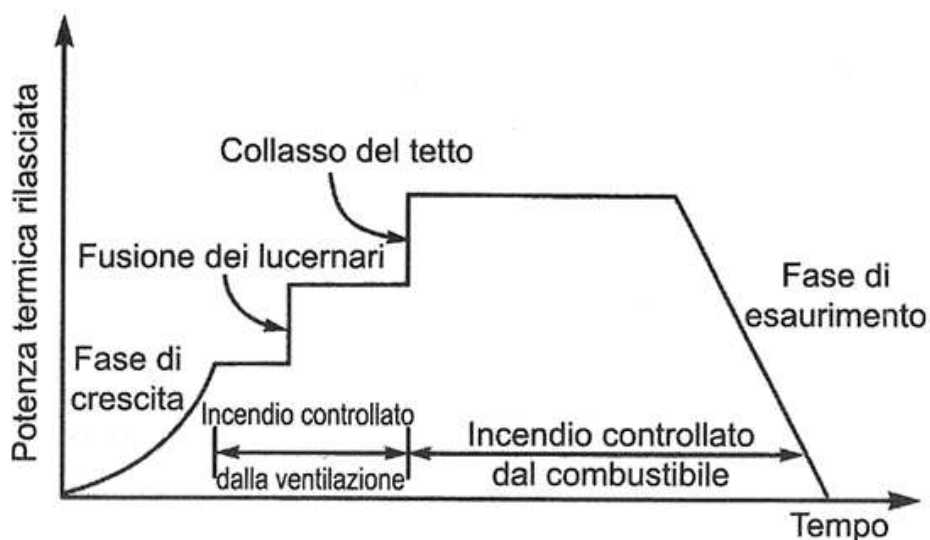


Figura 14.4-RHR

Gli edifici aventi dei telai a portale sono frequentemente progettati in prossimità di ulteriori immobili, tanto che uno degli obiettivi fondamentali della sicurezza antincendio è non permettere la propagazione dell'incendio ai danni delle aree circostanti. La propagazione dell'incendio è controllata da delle pareti perimetrali capaci di resistere al fuoco, le quali necessitano di un'appropriata progettazione a se stante dal momento che, in condizioni ordinarie di temperatura, i pannelli delle pareti vengono sostenuti per mezzo di apposti telai in acciaio, mentre si verifica una variazione del loro comportamento statico durante lo sviluppo dell'incendio.

Vi sono poi ulteriori strategie al fine di non permettere che l'incendio si propaghi, come la progettazione delle pareti esterne a sbalzo della fondazione, in maniera tale da assicurare la propria stabilità nel corso dell'incendio, oppure la costruzione di colonne aventi delle basi incernierate, in grado di far ruotare i pannelli delle pareti verso l'interno del comparto in fiamme.

Il metodo tradizionale prevede di fornire i telai a portale in acciaio di una base incastrata (o parzialmente incastrata) e di applicare alle colonne del portale una protezione antincendio di tipo passivo (elemento rosso in figura).

Figura 2: Sezione Trasversale

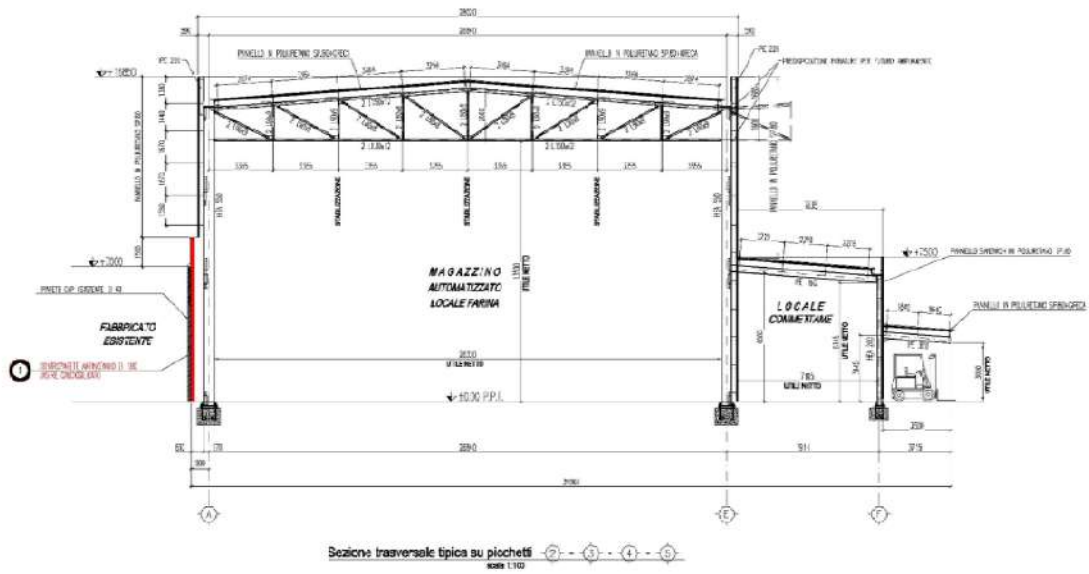


Figura 14.5-Telaio di studio

In questa eventualità, le pareti resistenti al fuoco vengono, prima dello sviluppo dell'incendio, sostenute dall'azione del telaio a portale. In un secondo momento, queste, nel mezzo dell'incendio, saranno invece sostenute attraverso delle colonne in acciaio incastrate alla base. Tali basi, del tutto o parzialmente incastrate, l'incendio provoca un'iniziale spinta verso l'esterno sulle colonne, mentre le travi della copertura di dilatano e si inflettono l'una dopo l'altra, per poi evidenziare una forza di trazione verso l'interno nel momento in cui le travi iniziano a formare una catenaria.

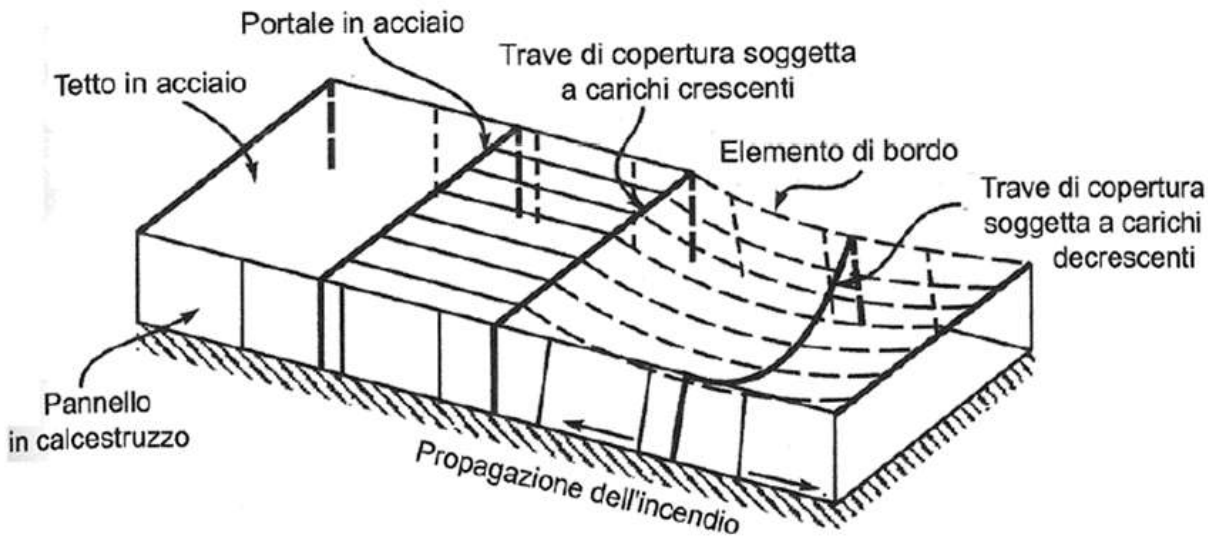


Figura 14.6-Tipo di collasso per un telaio monopiano

Un'ulteriore soluzione molto utilizzata per i telai a portale è quella che comporta di affidarsi a delle colonne realizzate in calcestruzzo armato, invece che a colonne in acciaio, il cui comportamento al termine dell'incendio è meno preoccupante. Un

distinto metodo consiste nell'equipaggiare i pannelli, fabbricati in calcestruzzo, delle pareti con un collegamento situato alla base solidale con una fondazione robusta, presumendo che questi restino in piedi dopo il collasso del tetto in acciaio, evento strettamente condizionato dal rapporto fra la struttura in metallo del tetto e i pannelli. Il verificarsi di un incendio nell'edificio porterà una deformazione all'esterno delle pareti a sbalzo, conseguentemente al gradiente termico attraverso la parete, per poi arrivare a provocare il collasso verso l'esterno se non è presente un collegamento idoneo fra ciascun pannello.

Altro metodo di progettazione consiste nel realizzare i telai a portale aventi con delle basi incernierate, escludendo l'uso di qualsiasi protezione contro il fuoco, in modo tale da sostenere i pannelli delle pareti in calcestruzzo, le quali risultano incernierate sia alla base che all'apice.

È molto importante che, in tale evenienza, la copertura possieda una data rigidità e che i pannelli in calcestruzzo delle pareti vengano collegati superiormente, ma anche che i collegamenti fra i telai in acciaio e l'apice dei pannelli mostrino un'idonea resistenza contro il fuoco. Le pareti appartenenti ad un simile edificio non collassano verso l'esterno, ma verso l'interno, implicando un'elevata difesa degli immobili limitrofi, sempre ammettendo che le pareti restino unite fra di loro durante il collasso verso l'interno, come viene evidenziato nella figura.

14.4 CINEMATICA DELLA STRUTTURA

Secondo quanto affermato dall'Eurocodice, nel momento in cui un incendio si sviluppa all'interno di una struttura in acciaio, il collasso strutturale non deve coinvolgere le altre strutture confinanti, in questo caso, infatti, si tratta di un telaio monopiano in acciaio, adiacente ad un'altra struttura, che s'intende proteggere da un eventuale collasso verso di essa, causato dall'incremento della temperatura dell'acciaio.



Figura 14.7-Struttura adiacente da proteggere

Ciò conduce ad un decremento delle proprietà meccaniche, che può causare o fenomeni di instabilità locale, dovuti al decadimento della rigidezza, oppure la formazione di cerniere plastiche, che rendono la struttura labile.

Inoltre i fenomeni di instabilità locale possono essere anticipati, a causa della riduzione della rigidezza del materiale: infatti la riduzione del modulo elastico dell'acciaio $K_{E,\theta}$ è più rapida di quella della resistenza.

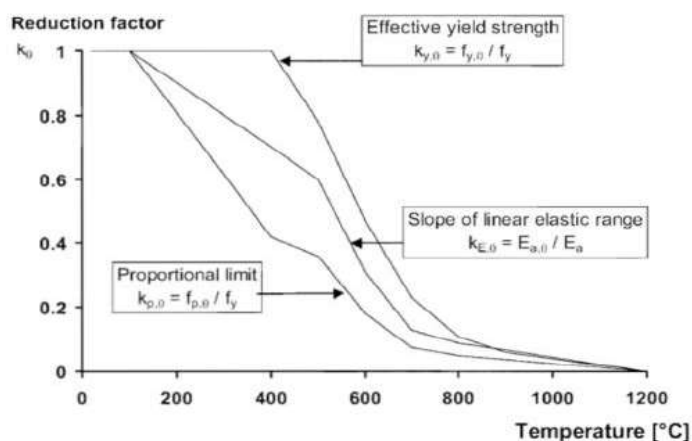


Figura 14.8-Coefficienti di riduzione

L'analisi di incendio all'interno dell'edificio richiede lo studio dei vari scenari, ma in questo caso il numero di quest'ultimi è relativamente basso.

L'incendio, infatti, potrebbe interessare le colonne o i controventi, elementi indispensabili per la stabilità strutturale, ma non si può certamente prescindere dai gas che, stratificandosi verso l'alto, portano ad un aumento delle temperature della capriata. Inoltre, anche la posizione dell'incendio e la combinazione di carico hanno un ruolo importante per il comportamento della struttura.

L'analisi termomeccanica è svolta con un codice di calcolo agli elementi finiti, in cui si analizza, come primo aspetto, il transitorio termico degli elementi strutturali, tenendo conto dei legami delle principali proprietà termiche, come calore specifico e conducibilità termica, con la temperatura, che varia secondo una curva naturale d'incendio.

Successivamente, s'impone un'analisi quasi statica in modo da studiarne il comportamento strutturale, che si analizza tenendo in considerazione la riduzione della resistenza meccanica. Si tiene conto, così, della presenza di azioni permanenti e di azioni variabili, che agiscono contemporaneamente all'incendio secondo la combinazione eccezionale.

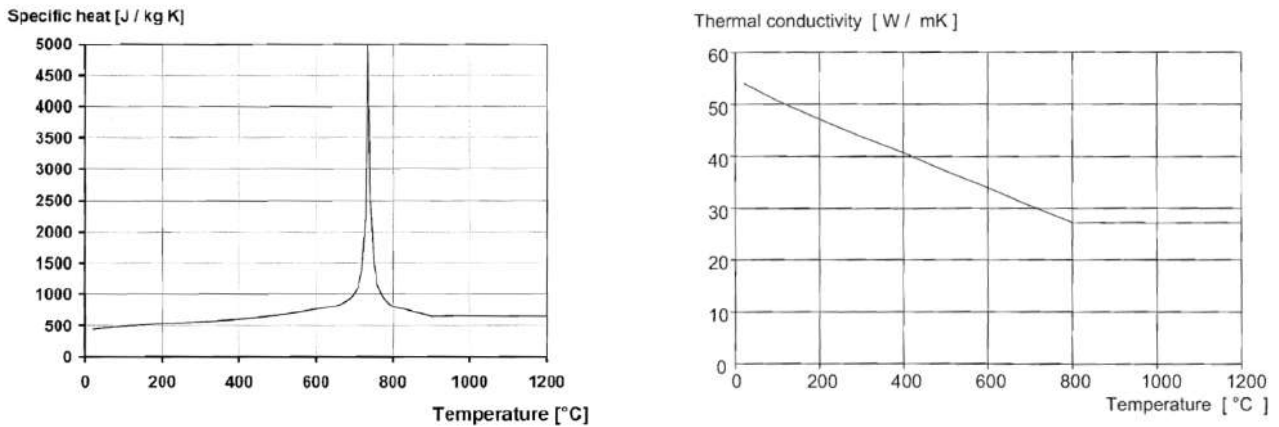


Figura 14.9-Calore specifico e conducibilità termica per l'acciaio

I telai in acciaio sotto azioni termiche, come quelle dovute all'incendio, tendono a crollare verso l'esterno, a causa della dilatazione termica della zona esposto alle fiamme, che può essere seguita da un ritiro causato del degrado termico dei materiali. La predominanza dell'uno o dell'altro individua il crollo implosivo oppure un crollo volto verso l'esterno.

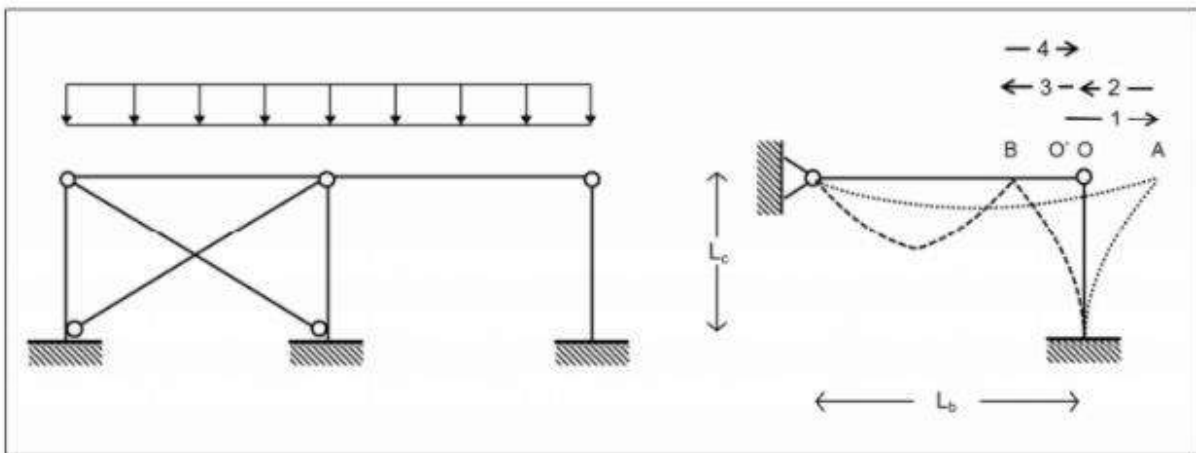


Figura 10.10-Modello a pendolo

Tramite le precedenti analisi globali, si sono analizzate le diverse fasi con cui la struttura in esame è andata a crollo:

1) *Espansione o crollo laterale*

Per effetto del riscaldamento, quando le temperature sono ancora relativamente basse e le proprietà degli elementi non sono ancora degradate, gli elementi della capriata

reticolare o le travi di collegamento tra i diversi pilastri, iniziano a dilatarsi, cosicché la parte superiore delle colonne subisce uno spostamento verso l'esterno in direzione X o Z. Nel frattempo, delle forze di compressione si sviluppano nella reticolare e nelle travi, poiché la dilatazione è contrastata dalla rigidità tagliente e flessionale delle colonne.

Alla temperatura di 200°C lo sforzo di compressione, dato dalla dilatazione contrastata, aumenta nel corrente superiore, che risulta già compresso per i carichi verticali, e diminuisce lo sforzo di trazione nel corrente inferiore. Se i vincoli all'espansione termica verso l'esterno non sono sufficientemente adeguati, si potrebbe verificare un collasso laterale.

2) *Pull-back*

Se la capriata non cede per elevati valori di compressione, o la trave di bordo non si instabilizza in direzione Z, la spinta verso l'esterno cessa per riduzione del modulo elastico e le colonne iniziano a muoversi indietro verso la loro posizione di riposo, cosicché i valori di compressione diminuiscono. Per temperature superiori le proprietà dell'acciaio degradano rapidamente, quindi diminuiscono la rigidità assiale e flettente dei correnti inferiore e superiore e la rigidità assiale delle aste di parete, determinando l'aumento della deformata della capriata o della trave di collegamento. Gli sforzi si trasferiscono gradualmente dagli elementi investiti direttamente dall'incendio a quelli contigui.

3) *Pull-in*

Il telaio, all'aumento della temperatura, si muove dalla posizione di riposo verso l'interno. In questo caso, si sviluppano delle cerniere plastiche e quindi la struttura riesce a sopportare il carico, anche grazie a configurazione di equilibrio raggiunta nei grandi spostamenti, con sviluppo del cosiddetto *effetto catena* e con conseguente stato tensionale di trazione dell'elemento. A circa 700 °C, infatti, si ha una deformata flessionale molto accentuata dei correnti inferiore e superiore e relativo allungamento in campo plastico della diagonale tesa, nonché la formazione di cerniere plastiche nelle travi di bordo.

4) *Collasso implosivo*

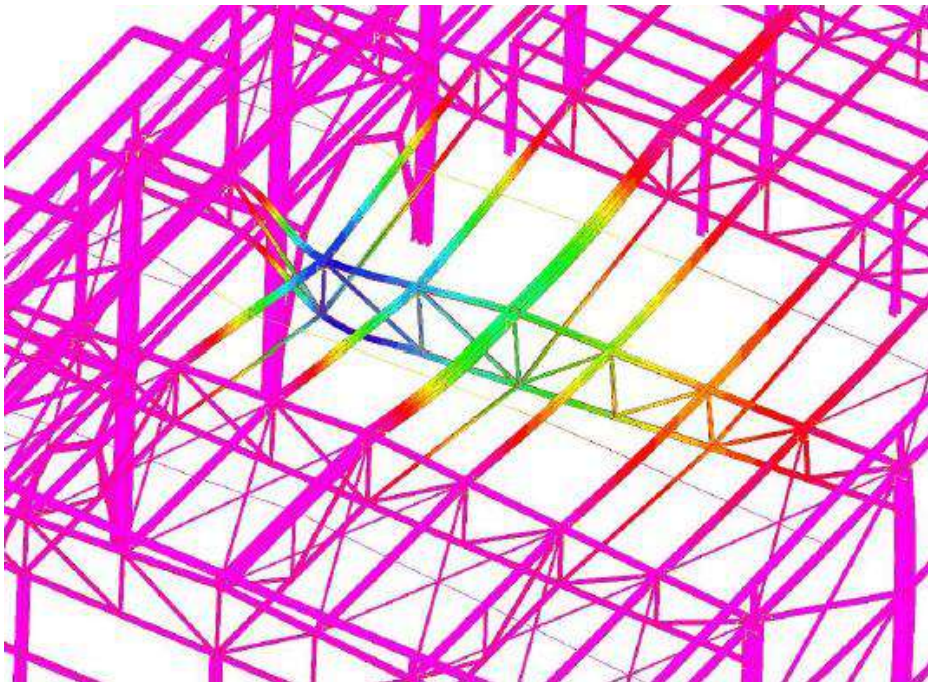
Se la capriata cede per le tensioni elevate, allora essa collasserà verso l'interno del telaio, mentre la colonna tornerà nella posizione di riposo a seguito del rilascio del tiro.

Lo stesso accadrà se il cedimento sarà dovuto alla trave di bordo.

Se la colonna, invece, non cede, il tiro continuerà finché non si giungerà al collasso del telaio.

In entrambi i casi si è evitato, col verificarsi di un collasso implosivo, un collasso laterale.

Inoltre, per ottenere, un efficace collasso verso l'interno, è richiesto un certo livello di vincolo alla base delle colonne, al fine di evitare svii verso l'esterno. Altro elemento fondamentale è l'adeguata disposizione dei controventi. Il tutto concorre ad avere una struttura fortemente iperstatica in grado di poter superare le diverse fasi di crisi.



Affinché ci possa essere un collasso di tipo implosivo, le connessioni fra i vari elementi devono essere ben progettate e verificate alle alte temperature.

Qui di seguito si riportano gli altri scenari alle massime temperature raggiunte, evidenziando come la crisi sia avvenuta per collasso implosivo.

ANALISI FEM

Il FEM, ovvero il metodo degli elementi finiti, è una metodologia numerica, utile per ricercare delle soluzioni approssimate per ciò che concerne i problemi indicati dalle equazioni differenziali alle derivate parziali, le quali sono ridotte ad un semplice sistema di equazioni di tipo algebrico.

Anche se il FEM è in grado di competere con altri metodi numerici, quali il metodo dei volumi finiti o quello spettrale, esso permane il principale metodo di approssimazione. Oltretutto, il FEM è il fondamento teorico della maggioranza dei codici, utili all'analisi automatica, che risultano in vendita.

Solitamente, tale metodo è utilissimo per la risoluzione delle equazioni derivate parziali nel momento in cui:

- Il dominio possiede una forma molto complessa, come nel caso del motore di un aereo o del telaio di un'auto;
- La precisione necessaria per la risoluzione è disomogenea sul dominio;
- La soluzione che si cerca è lacunosa dal punto di vista della regolarità;
- Il dominio risulta variabile.

Per indicare il metodo agli elementi finiti, si fa riferimento al Finite Element Method (FEM), mentre, al fine di riferirsi all'analisi degli elementi finiti, occorre utilizzare il Finite Element Analysis (FEA).

1 FUNZIONAMENTO

Il metodo agli elementi finiti è utilizzato per i corpi che possono essere divisi in un dato numero di elementi con una precisa forma, aventi delle limitate dimensioni. Ciascun elemento finito si considera in un campo di integrazione numerica con delle proprietà uniformi. Il FEM è caratterizzato dalla discretizzazione per mezzo di una griglia, detta mesh, formata da una serie di primitive, ovvero gli elementi finiti, aventi una determinata forma, quella di tetraedri ed esaedri per i domini in 3D e quella di quadrilateri e triangoli per i domini 2D. Per ogni elemento con tali forme, si ha una soluzione per mezzo della combinazione lineare delle cosiddette *shape functions*, ovvero delle *funzioni di forma*, chiamate anche *funzioni di base*.

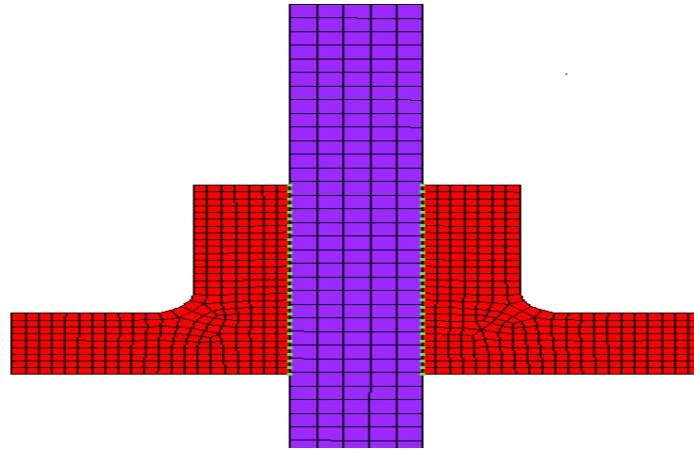


Figura 1.1-Discretizzazione

Nel momento in cui si approssima la funzione, non si avranno i precisi valori della funzione computati in quei punti, ma quelli in grado di fornire l'errore minore considerando completamente la soluzione. Un esempio riguarda quello delle funzioni polinomiali, ove la soluzione si approssima utilizzando una funzione polinomiale frammentata. In questo modo, la soluzione per ciascun elemento è definita da un numero di coefficienti correlato al grado del polinomio preso in considerazione, il quale provvede alla precisione della soluzione numerica.

Il FEM è utile anche per la risoluzione di problemi basati sulle leggi costitutive lineari. Ne sono caratteristici i problemi riguardanti:

- Il diffondersi del calore in un corpo materiale;
- Le deformazioni e gli sforzi nel campo elastico.

Inoltre, vi sono delle soluzioni che permettono l'esplorazione del comportamento dei materiali in un campo non lineare, implicando un comportamento visco-plastico oppure plastico.

Queste problematiche si tengono in conto solitamente in coppia, per cui si è in grado di risolvere, nello stesso momento, vari aspetti complementari, i quali sono da ricondurre separatamente ad un FEM.

Il FEM, essendo annoverato nella classe appartenente alla metodologia di Galërkin, dimostra, inizialmente, una formulazione debole riguardante un problema di tipo differenziale. Tale tipologia di formulazione, incentrata sull'idea di integrale di Lebesgue, ma anche sulle distribuzioni e sulla media pesata, possiede il grande merito di portare a soluzioni con regolarità realistica per la maggior parte dei problemi di

stampo ingegneristico. Le metodologie di Galërkin sono fondate sull'approssimazione della soluzione di un problema esposto in forma debole per mezzo della combinazione lineare delle shape functions. I gradi di libertà, ovvero i coefficienti appartenenti ad una simile combinazione lineare, divengono le incognite del problema algebrico, ricavata attraverso la discretizzazione. Gli elementi finiti sono caratterizzati dalla predilezione di funzioni di forma polinomiali a pezzi, mentre altre metodologie di Galërkin applicano delle differenti *shape functions*.

2 FASI PER ARRIVARE AL MODELLO

Per giungere al FEM devono essere seguiti degli step basilari, ciascuno dei quali implica l'inserzione di errori all'interno della soluzione finale:

- La modellazione, tipica di ogni analisi ingegneristica. In tale step si parte da un sistema di tipo fisica per giungere ad un modello di stampo matematico, capace di estrapolare delle caratteristiche fondamentali del precedente sistema, analizzando attentamente le poche variabili aggiunte che si possono considerare utili, mentre si tralasciano le restanti. Per calcolare il momento flettente di una trave, non sono considerate le iterazioni molecolari. Inoltre, si suddivide il sistema fisico, se necessario, in una serie di sottosistemi. Successivamente, si passerà ad una suddivisione del modello in elementi finiti, ai quali sarà applicato un modello di stampo matematico. Inoltre, il modello matematico preso come riferimento deve semplicemente essere idoneo alle geometrie semplici. Per quanto riguarda, invece, la predilezione di una tipologia di elemento in un programma software, essa implica il modello matematico su cui si fonda. Occorre, oltretutto, valutare l'errore dato dal modello matematico con l'ausilio di una serie di prove sperimentali, un processo capace di portar via molte risorse e tanto tempo;
- La discretizzazione, in cui si passa da una cifra infinita di gradi di libertà, proprietà caratteristica del *continuum*, ad un numero limitato, come nel *mesh*. Oltretutto, discretizzare nel tempo, oppure nello spazio, è utile al fine di avere un modello discreto con un dato quantitativo di gradi di libertà. Inoltre, s'inserisce un errore conseguente alla discordanza con la precisa soluzione fornita dal modello matematico.

3 CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI

Ciascun elemento possiede:

- Delle dimensioni del tipo 1D, 2D oppure 3D;

- Dei punti precisi che definiscano la geometria propria dell'elemento in considerazione, i quali prendono il nome di *nodi*. Ciascuno di questi si ricollega al gradiente caratteristico della struttura, oppure al valore proprio di un campo;
- I gradi di libertà, cioè il numero di variabili indipendenti utili alla definizione univoca delle sue coordinate;
- Le forze sui nodi, ovvero le conseguenze delle reazioni di tipo vincolare oppure le forze esterne che si applicano sui nodi.

Il vettore f delle forze esterne agenti sul nodo e quello u dei *degrees of freedom*, detti anche DOF, ovvero appartenente ai gradi di libertà, hanno una reciproca linearità pari a:

$$Ku=f$$

In cui:

- K indica la stiffness matrix, ovvero la matrice di rigidità.

La relazione sopra indicata definisce la dualità presente fra gli spostamenti e le forze esterne. Il prodotto scalare fra f ed u , inoltre, si ricollega al lavoro effettuato dalle forze esterne.

Le espressioni come *reazione vincolare*, *forza* o *matrice di rigidità* sono utilizzate anche per ciò che concerne le strutture meccaniche, per cui è nato il FEM.

Le proprietà costitutive, inoltre, sono quelle peculiari dell'elemento, comprendendo anche quelle relative al suo comportamento. Successivamente, sarà delineato un materiale isotropo, avente un comportamento lineare di tipo elastico, con il suo coefficiente di Poisson e il relativo modulo di Young.

Per ciò che concerne un sistema di equazioni, anche del tipo non lineare, che sono state risolte dall'elaboratore per mezzo di opportuni calcoli, s'introduce un errore numerico, il quale può non essere considerato per i sistemi lineari, come quello qui analizzato.

4 TIPOLOGIA DI ELEMENTI FINITI

I programmi che applicano il FEM per un'analisi strutturale possiedono una libreria limitata di elementi finiti, sia nel campo elasto-plastico, sia in quello lineare, del tipo mono-, bi- e tri- dimensionali, al fine di rendere la modellazione di una struttura reale il più semplice possibile.

Gli elementi finiti più utilizzati sono:

Monodimensionali:

- La *truss*, detta anche biella oppure aste, ovvero un elemento del tipo rettilineo avente due nodi e con una rigidezza esclusivamente per le traslazioni. Per tale motivo, si applica per una trasmissione delle forze assiali. Inoltre, è generalmente usato per modellare strutture reticolari;
- Il *beam*, oppure trave, cioè un elemento rettilineo a due nodi in grado di trasmettere le rigidezze per ogni DOF ai nodi a cui risulta collegato. È utile, dunque, per trasferire ogni tipo di sollecitazione e si utilizza anche per la modellazione delle strutture con telaio. Oltretutto, vi sono anche dei programmi con il beam su un suolo elastico alla Winkler per modellare le travi atte alla fondazione su di un suolo di tipologia elastica;
- Il *rigel*, detto anche rigido, ovvero un elemento rettilineo a due nodi con una rigidezza pressoché infinita, utile alla modellazione di una connessione ugualmente rigida fra due elementi di tipo finito.

Bidimensionali:

- *Stress plane*, detta anche lastra, ovvero l'elemento piano costituito da tre o quattro nodi per ogni strato di sforzo piano con due rilevanti libertà per ciascun nodo, equivalenti alla rigidezza membranale. Per tale motivo, è idonea per la trasmissione esclusiva degli sforzi sul proprio piano. Non permette, infatti, il trasferimento di nessuna rigidezza per gli ulteriori gradi di libertà. È applicato per modellare le strutture caricate nel proprio piano;
- La piastra, cioè un elemento piano avente tre o quattro nodi con tre DOF per ciascun nodo, equivalenti alla traslazione perpendicolare nel proprio piano e alla rigidezza flessionale. Per tale motivo, è utilizzato nella trasmissione dei due momenti flettenti e dello sforzo tagliente. Non permette il trasferimento di nessuna rigidezza per gli altri DOF. Inoltre, è utilizzato per modellare le strutture inflesse a due dimensioni. Oltretutto, sono presenti dei software aventi la piastra su suolo alla Winkler utile per modellare le platee di fondazione su di un suolo elastico.
- Lo *shell*, detto guscio o lastra-piastra, ovvero l'elemento piano avente tre o quattro nodi con sovrapposizione della piastra e della lastra. Possiede, dunque, sia rigidezza membranale che flessionale.

Tridimensionali:

- Il brick, oppure elemento solido, avente dai quattro ai ventisette nodi con solamente tre DOF per ciascun nodo, equivalenti alle tre traslazioni. Non permette il trasferimento di nessuna rigidezza per gli altri DOF. Si tratta di un elemento finito, capace di modellare elementi strutturali solidi, in cui alcuna dimensione risulta trascurabile rispetto alle restanti. Inoltre, il brick permette di

analizzare uno stato tensionale a tre dimensioni, oltre ad essere utilizzato ai fini della modellazione della stratigrafia del suolo.

5 SOFTWARE DI ANALISI: STRAUS7

Straus7 è un software per FEM, realizzato da G+D Computing. Esso non è altro che un nuovo tipo d'implementazione, apposta per Windows.

Il sistema possiede una concezione del tipo unitario, avente pre- e post- processor originali, utile per costruire modelli ad elementi finiti, con relativa analisi ed estrapolazione dei risultati. Sviluppo e concezione sono stati realizzati in un solo gruppo di competenze, perciò Straus7 è integrato in ogni sua singola parte e dimostra di essere estremamente compatto.

Il software in questione, utilizzato nei vari ambiti dell'ingegneria, ma anche nell'industria dei materiali e in quella pesante, è idoneo per tutti gli ambienti e per le dimensioni strutturali,

Inoltre, alcune società particolarmente qualificate si occupano della sua distribuzione e del suo sostentamento sia in Europa che in tutto il mondo.

Straus7 è in grado di affrontare e risolvere:

- L'analisi del trasporto di calore in regime stazionario lineare e non lineare;
- L'analisi dinamica nel transitorio lineare e non lineare;
- La stabilità dell'equilibrio;
- L'analisi statica, lineare e non-lineare;
- Il calcolo delle frequenze naturali;
- L'analisi del trasporto del calore in regime transitorio lineare e non lineare.
- L'analisi della risposta armonica;
- La stabilità dell'equilibrio;
- L'analisi della risposta spettrale.

Le metodologie per la risoluzione nell'ambito della non-linearità implicano le non linearità geometriche sia per le condizioni al contorno, come nel caso dei problemi di contatto, sia per i materiali, includendo le grandi deformazioni e la plasticità. Queste non linearità sono da considerare come le condizioni iniziali ai fini del computo dei moltiplicatori critici per stabilizzare l'equilibrio e delle frequenze naturali

Il software in questione cataloga gli elementi in base al loro “ordine dimensionale”, mostrando le seguenti tipologie:

ELEMENTI MONODIMENSIONALI (BEAM):

- Molla/smorzatore;
- Funi o cables;
- A sola rigidità assiale o truss;
- Aste a cedimento programmato o cutoff bars;
- Trave;
- Elementi (trave) fissati dall'utente;
- Contatto puntuale o point contacts.

ELEMENTI BIDIMENSIONALI (PLATE):

- Triangolari a tre o sei nodi;
- Quadrilateri a quattro, otto o nove nodi.

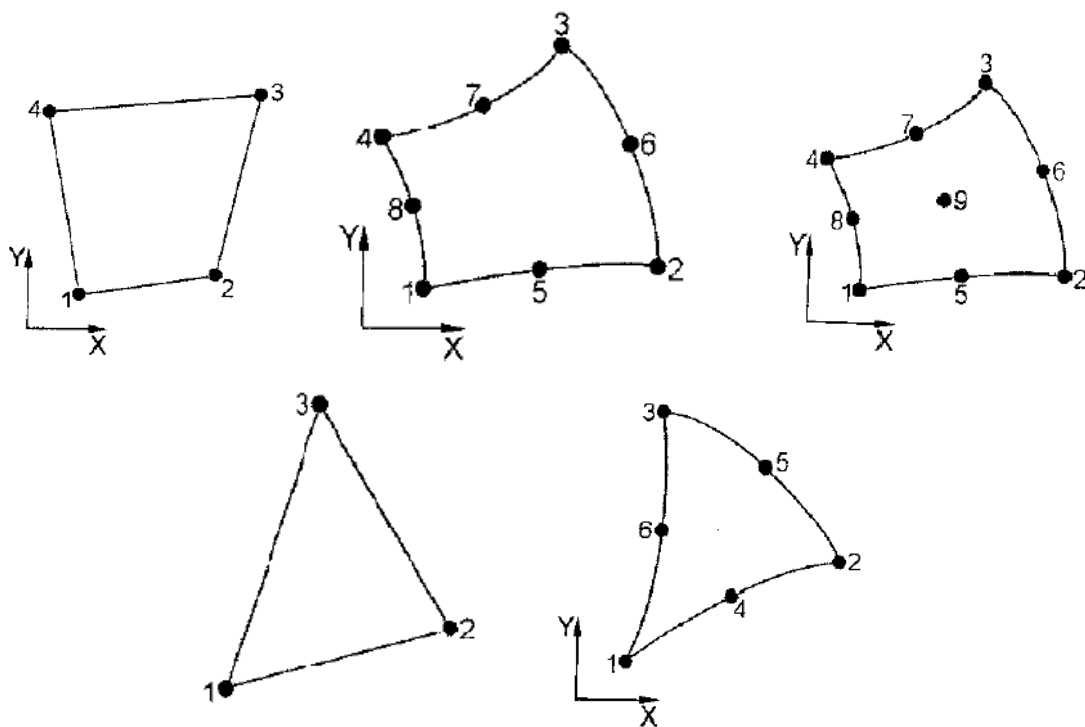


Figura 5.1-Elementi plate/shell

ELEMENTI TRIDIMENSIONALI O BRICK:

- Tetraedri a quattro oppure a dieci nodi;
- A piramide a cinque o a tredici nodi;

- A cuneo a sei o quindici nodi;
- Esaedrici a otto, a sedici oppure venti nodi.

LINK O ELEMENTI DI COLLEGAMENTO:

- Pinned sia rigidi che incernierati;
- Rigidi;
- A simmetria settoriale o ciclica;
- Master/slave, cioè con dipendenze funzionali tra i DOF.

MATERIALI

I modelli e le proprietà riguardanti i materiali si definiscono per mezzo di una diretta assegnazione oppure tramite l'accesso ad un data-base preimpostato. Nell'eventualità di leggi non lineari, le leggi di comportamento si assegnano per punti.

Il software tiene in considerazione dei seguenti modelli di materiale:

- Definito dall'utente;
- Ortotropo;
- Anisotropo;
- Drucker-Prager;
- Laminato;
- Isotropo;
- Gomma;
- Suolo;
- Mohr-Coulomb.

La zona di pre-processing possiede degli strumenti utili per manipolare sia la geometria che gli elementi, semplificando la progettazione del modello, anche nell'eventualità di strutture molto complesse. Per ciascun elemento, si prevede un'opportuna illustrazione grafica, capace di aiutare a visualizzare il modello.

Per quanto riguarda l'ambiente di post-processing, questo è stato realizzato in modo tale da permettere di gestire i risultati in maniera semplice, sia graficamente che sotto forma di relazione o di foglio elettronico. Il codice è in grado di permettere, inoltre, la visione e la stampa dei testi e dei risultati grafici, funzionalità raffrontabili a quelle proprie dei diversi Word-processor, ma che in Straus7 sono integrate al codice di calcolo.

6 L'ANALISI DEL TRASPORTO DEL CALORE

Il fine dell'analisi riguardante il trasferimento del calore è la determinazione della distribuzione della temperatura e della rapidità nel successivo scambio termico.

Il software è in grado di supportare i seguenti modi per il passaggio del calore:

- Conduzione;
- Scambio di calore per radiazione;
- Trasferimento di calore convettivo.

Mentre la conduzione rappresenta il principale metodo di passaggio del calore nel modello considerato, la radiazione e la convezione sono entrambi tipologie di scambio termico fra l'ambiente e il modello.

7 FORMULAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI

Per discretizzare gli elementi finiti, si può descrivere il campo di temperatura nell'elemento in questo modo:

$$T = Nt$$

In cui:

- N è la matrice delle funzioni di forma;
- t rappresenta il vettore delle temperature nodali.

N si può esprimere come riportato di seguito:

$$N = [N_1(\xi) \quad N_2(\xi) \quad N_3(\xi) \quad \dots \quad \dots \quad N_n(\xi)]$$

In cui:

ξ è il vettore coordinate naturali;

n indica il numero di elementi nodali.

$N_i(\xi)$ sono le shape functions per l' i -esimo nodo ($i = 1, 2, \dots, n$).

Come detto in precedenza, il flusso del calore è relativo al gradiente di temperatura.

Per mezzo di $T = Nt$, il vettore in 3D del gradiente della temperatura,

$$g = \nabla T = \left[\frac{\partial T}{\partial X} \quad \frac{\partial T}{\partial Y} \quad \frac{\partial T}{\partial Z} \right]^T$$

Si può esprimere nel seguente modo:

$$g = Bt$$

In cui:

B indica la matrice appartenente al gradiente delle temperature:

$$B = \nabla N = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial X} & \frac{\partial N_2}{\partial X} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial X} \\ \frac{\partial N_1}{\partial Y} & \frac{\partial N_2}{\partial Y} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial Y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial Z} & \frac{\partial N_2}{\partial Z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial Z} \end{bmatrix}$$

Per ciò che concerne le matrici globali, esse sono ricavate per mezzo dell'unione dei vari elementi di ogni matrice. Tali matrici si possono calcolare con le formule:

- La matrice della capacità termica dell'elemento:

$$C_e = \int_V \rho c N^T N dV$$

In cui:

- ρ e c indicano la densità e il calore specifico del materiale.
- La matrice della conducibilità

$$K_e = \int_V B^T k B dV + \int_{S_3} h_c N^T N dS + \int_{S_4} \sigma h_r (T^2 + T_a^2) (T + T_a) N^T N dS$$

In cui:

- k è la matrice di conducibilità del materiale:

$$k = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_y \end{bmatrix}$$

Con:

- h_c è il coefficiente di scambio termico per convezione sulla superficie S_3 ;
 - T indica la temperatura corrente;
 - σ è la costante di Stefan-Boltzmann;
 - T_a indica la temperatura ambiente di radiazione sulla superficie S_4 ;
 - S_4 si riferisce all'area con una determinata condizione al contorno di radiazione;
 - S_3 si riferisce alla superficie con determinata condizione al contorno di convezione;
 - h_r indica il coefficiente di scambio termico per radiazione sulla superficie S_4 .
- Il vettore dell'elemento del carico termico è

$$p_e = \int_V N^T Q dV + \int_{S_2} N^T q_s dS + \int_{S_3} h_c N^T T_f dS + \int_{S_4} \sigma h_r (T^2 + T_a^2) (T + T_a) N^T N dS$$

In cui:

- q_c è il flusso di calore sulla superficie S_2 ;
- S_2 è l'area con un dato flusso di calore;
- Q si riferisce alla fonte di calore dell'elemento;
- T_f indica la temperatura ambiente di convezione sulla superficie S_2 .

8 UTILIZZO DEI RISULTATI PER L'ANALISI STRUTTURALE

I risultati della FEM e lo stato stazionario possono essere applicati in un modello per delineare la distribuzione della temperatura all'interno dei risolutori strutturali. La distribuzione della temperatura avente una costante evoluzione del calore, per esempio, può accadere in una particolarissima condizione di carico, oltre ad essere applicata come un campo di temperatura, portando ad una serie di dilatazione termiche negli elementi.

Struss7 è in grado di applicare il risultato della soluzione del calore nel regime transitorio all'analisi transitoria dinamica in maniera diretta. Attraverso tale possibilità, il solver in regime dinamico temporaneo introduce, ad ogni singolo passo temporale dell'analisi dinamica transitoria, una distribuzione di temperatura del modello della soluzione transitoria. Si osservi come per queste analisi, la frequenza di salvataggio ed il passo temporale dei risultati applicati nell'analisi termica transitoria non corrispondano a quelli dell'analisi dinamica transitoria. Nel momento in cui il tempo

dell'analisi dinamica oltrepassa quello dell'analisi termica transitoria, la distribuzione della temperatura resta costante ed uguale alla distribuzione nell'ultimo passaggio salvato nella soluzione del calore nel regime di tipo transitorio.

Se il FEM per il passaggio del calore è applicato per le seguenti sollecitazioni, le diverse tipologie di elementi, la qualità e le forme del *mesh* sono maggiormente relazionati alle analisi tensionali, piuttosto che dalle analisi del campo delle temperature.

Un normale gradiente di temperatura, ad esempio, riesce ad apportare degli importanti gradienti di deformazione e a generare, conseguentemente, delle importanti concentrazioni delle tensioni.

Ai fini del calcolo per la sollecitazione termica, nell'eventualità di campi di temperatura disomogenea, gli elementi con un ordine maggiore, come i quad8 o i qua9, sono maggiormente precisi rispetto a quelli con un ordine più basso, come i quad4.

9 ALTRE APPLICAZIONI DEL SOLUTORE TERMICO

L'equazione utile a regolare il costante flusso del calore all'interno di un solido, ovvero quella di Laplace, è solitamente utilizzata per i diversi problemi nel campo della fisica. Per tale motivo, il solver si può utilizzare in modo diretto per diverse tipologie di analisi, dopo che si è stabilita l'analogia che collega le diverse variabili presenti.

La generale equazione di Laplace corrisponde a:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(k_x \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(k_y \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(k_z \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \right) + Q = 0$$

I diversi problemi riguardanti il campo, i quali sono risolvibili per mezzo del solver termico stazionario, si ritrovano nella tabella 4.1:

Problema di campo	Incognite	k_x, k_y, k_z	Q
Trasferimento calore	Temperatura	Conducibilità termica	Sorgente di calore interno
Infiltrazioni	Pressione idraulica	Permeabilità	Zero
Flusso incomprimibile	Funzione di corrente	<i>Coesione</i>	Vorticità

Flusso incompressibile	Velocità potenziale	Coesione	Zero
Torsione elastica	Funzione tensionale	Modulo elasticità tangenziale	Tasso di torsione
Conduzione elettrica	Tensione	Conducibilità elettrica	Zero
Diffusione gas	Concentrazione	Diffusività	Zero
Elettrostatica	Permettività	Densità di carica	Zero
Magnetostatica	Potenziale magnetico	Resistività	Densità di carica

10 SOLUZIONE IN REGIME STAZIONARIO

Il solver di calore nel regime stazionario computa la distribuzione della temperatura in una struttura in condizioni di equilibrio stabile oppure stazionarie. Ciò significa che la distribuzione della temperatura da delineare non è altro che una funzione avente coordinate spaziali X, Y e Z, completamente indipendente dal tempo.

Inoltre, il solver considera diverse modi per il passaggio del calore, come la convezione, l'irraggiamento e la conduzione. L'output di base nel regime stazionario è un unico valore della temperatura per ogni nodo. Per tale motivo, ricavate le temperature dei nodi, il flusso dell'elemento e quello nodale si può delineare analogamente alla soluzione strutturale, ove le relazioni delle sollecitazioni agli elementi e dei nodi si precisano partendo dai movimenti nodali.

Uno dei problemi riguardanti il passaggio del calore in regime stazionario è la linearità o la non linearità, in funzione dei vari processi con cui avviene il passaggio del calore e della temperatura del materiale in esame. Un problema lineare può, infatti, implicare la conduzione e la convezione, oltre alle proprietà dei materiali usati che devono essere in funzione della temperatura. Nel momento in cui un evento implica il passaggio del calore attraverso l'irraggiamento, oppure la temperatura dipende dalle proprietà dei materiali, il caso è del tipo non lineare. I due problemi, inoltre, devono essere risolti con diverse tipologie di algoritmi. Per quanto riguarda i problemi non-lineari, invece, si necessita di un processo iterativo di soluzione, implicando un lungo lasso di tempo per giungere alla soluzione.

11 EQUAZIONE DI EQUILIBRIO

Per quanto riguarda un problema relativo al trasferimento del calore nel regime stazionario, il sistema, capace di trovare la condizione di equilibrio, è:

$$k \cdot t = f$$

In cui:

- K indica la matrice di conducibilità totale;
- f è il vettore del carico termico utilizzato;
- t indica il vettore ignoto delle temperature dei nodi.

Per quanto riguarda la matrice della conducibilità globale e del vettore del carico termico utilizzato, essi sono entrambi ricavati per mezzo delle matrici di conducibilità dei diversi elementi e del vettore del carico termico utilizzato agli elementi nodali. I vettori riguardanti il carico termico degli elementi si ottengono per mezzo dei coefficienti di irraggiamento e di convezione, ma anche per mezzo delle temperature nodali specificate.

Tramite la risoluzione dell'equazione di equilibrio, si ottiene il vettore incognito delle temperature dei nodi t . Oltretutto, occorre considerare che, relativamente ai problemi non lineari, la matrice di conducibilità dell'elemento e/o del vettore dei carichi termici sono in funzione della distribuzione della temperatura finale.

Con ciò, il vettore di carico f e la matrice K hanno bisogno di essere aggiornati nel momento in cui si ottiene il vettore delle temperature nodali t , in modo da avere delle equazioni risolte e delineate. Tale processo iterativo si ferma nel momento in cui si raggiunge la convergenza. I procedimenti per risolvere i casi non lineari e lineari sono raffrontabili a quelle che riguardano le equazioni strutturali.

Dopo che il vettore delle temperature dei nodi è stato delineato, si possono calcolare i flussi nodali del calore e quello del calore, ma anche il gradiente di temperatura degli elementi.

Per ciò che riguarda i gradienti termici in un qualsiasi punto nell'elemento, essi sono ricavabili da:

$$g = b \cdot t$$

In cui:

- B indica la matrice delle derivate delle funzioni di forma dei punti;
- t è il vettore delle temperature nodali dell'elemento

Il flusso di calore dell'elemento si ottiene:

$$q = -k \cdot B \cdot T$$

In cui:

- k si riferisce alla matrice di conducibilità del materiale.

Il contributo del flusso nodale, invece, è ottenuto come:

$$q_n = -k_e \cdot T$$

In cui:

- K_e indica la matrice di conducibilità totale dell'elemento

12 SOLUZIONE IN REGIME TRANSITORIO

- *Equazione di equilibrio*

Il solver termico in regime transitorio permette la risoluzione della seguente equazione:

$$K \cdot t + C \cdot t' = f$$

In cui:

- t : è il vettore delle temperature nodali incognito, dipendente sia dal tempo che dalla temperatura;
- C indica la matrice della capacità termica globale;
- f è il vettore dei carichi termici applicati;
- K indica la matrice di conducibilità globale;
- t' si riferisce alla variazione di t in funzione del tempo.

Come per il caso di stato stazionario, il solver termico transitorio tiene in conto dei tre processi fondamentali con cui il calore si trasmette, ovvero la convezione, l'irraggiamento e la conduzione. In tal caso il calcolatore fornisce una totalità delle

temperature nodali in relazione al tempo. Ciò permette di avere un'approssimazione puntiforme relativamente alla variazione della temperatura nella struttura con riferimento al tempo.

Vi sono due tipi di soluzioni:

- Non lineare, ovvero qualsivoglia problema che prenda in considerazione la trasmissione del calore per mezzo dell'irraggiamento e le proprietà dei materiali, le quali si trovano in funzione del tempo e della temperatura;
- Lineare, in cui i problemi riguardano i modi di convezione e conduzione del passaggio del calore. In tale problema si hanno delle proprietà del materiale indipendenti sia dal tempo e con una temperatura variabile in funzione di questo.

12.1 PARAMETRI DEL SOLUTORE

Condizioni iniziali

Nell'analisi transiente, si avrà una soluzione della storia temporale in dipendenza della distribuzione della temperatura iniziale della struttura, la quale risulta inizialmente trascurabile nel solver stazionario. Tale distribuzione iniziale si definisce:

- In tutti i nodi in cui si assegna una temperatura iniziale di riferimento, la quale sarà applicata come valore iniziale. In questi nodi, la temperatura subisce una serie di modifiche nel corso della soluzione, in base al flusso del calore nel modello;
- Nei nodi in cui si assegna una temperatura iniziale utilizzata durante il processo risolutivo. Il solver trascura la temperatura di riferimento in questi nodi. Inoltre, questa temperatura subisce delle variazioni durante la soluzione stessa, in base al flusso di calore presente nel modello.

12.2 CONDIZIONI INIZIALI

1. Tempo di integrazione

La metodologia di integrazione in relazione al tempo è applicata per la risoluzione dell'equazione di equilibrio. Ipotizzando che la temperatura e le sue derivate al tempo $t + \theta\Delta t$, un punto fra gli intervalli di tempo t e $t+\Delta t$, siano ricavabili in tal modo:

$$T^{t+\theta\Delta t} = (1 - \theta)T^{t+\Delta t} + \theta T^t$$

$$T^{t+\theta\Delta t} = \frac{T^{t+\Delta t} - T^t}{\Delta t}$$

In cui:

- ϑ si riferisce al parametro di rilassamento;
- Δt sono le dimensioni del passo temporale.

L'equazione di equilibrio si riscrive come segue:

$$\left[(1 - \vartheta)K + \frac{1}{\Delta t} C \right] t^{t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\Delta t} C - \vartheta K \right) t^t + f$$

In cui:

$$f = (1 - \vartheta)f^{t+\Delta t} + \vartheta f^t$$

Si tratta di un'espressione iterativa per t , capace di delineare la soluzione di t per ogni passo temporale all'interno di un intervallo di tempo specificato.

2. Parametro di rilassamento ϑ

Tale parametro è individuato per apportare una stabilità idonea, oltre che una maggiore precisione del processo di integrazione in relazione al tempo, utile per le relazioni espresse nel sotto paragrafo II.

Per quanto riguarda i vari valori di ϑ , gli schemi corrispondenti dell'integrazioni sono riportati all'interno della Tabella 4.2.

Si consigliano i valori $\vartheta = 0.5$ o $\vartheta = 0.667$.

Inoltre, la soluzione ricavata sarà stabile per ogni valore di $\vartheta \geq 0,5$, mentre si verificherà una degradazione dell'accuratezza per valori di ϑ vicini ad 1.

Un'analisi transitoria rapida può recare una serie di oscillazioni all'interno della soluzione, ma queste si possono diminuire per mezzo di un minor lasso temporale, oppure di uno smorzamento numerico per mezzo di un incremento di ϑ .

ϑ	Schema
0	Eulero
0,5	Differenze centrali Crank-Nicholson
0,6667	Discretizzazione in elementi finiti secondo Galerkin
1	Schema implicito

3. Passo temporale

Il procedimento di integrazione temporale comporta un'approssimazione della soluzione per un avvicinamento alle derivate appartenenti alla temperatura. Conseguentemente a questo, il processo d'integrazione avrà un processo fortemente collegato al passo temporale.

In base ai valori del parametro di rilassamento, si avrà una dimensione del passo temporale con limite superiore, in maniera tale che l'algoritmo risulti stabile e non si comporti in maniera oscillatoria.

Nel momento in cui ϑ è superiore a 0,5, si avrà un passo temporale del tempo ai fini della stabilità pari a:

$$\Delta t_{critico} = \frac{2}{(1 - 2\vartheta)\lambda_{max}}$$

In λ è il massimo autovalore dell'equazione:

$$K - h \cdot C = 0$$

Dunque, risulta opportuno utilizzare un passo temporale molto minore rispetto a quello del limite di stabilità, poiché, nel caso in cui la soluzione sia stabile, si potrebbe contenere un comportamento del tipo oscillatorio. Si consiglia, pertanto, un passo temporale pari a:

$$\Delta t_{medio} = \frac{\Delta t_{critico}}{100}$$

Se il passo temporale risulta troppo grande e/o il mesh eccessivamente approssimato, è presente l'eventualità che la soluzione possa andare oltre il limite, per poi convergere ad una corretta soluzione, come mostrato dalla figura 4.4.

CASO DI STUDIO

Trattasi della valutazione del comportamento al fuoco di un deposito intensivo verticale, costituito da un unico compartimento. All'interno della struttura, si individuano tre locali, mentre il materiale prevalentemente depositato è farina in sacchi. È, inoltre, presente una macchina automatizzata a gravità.

L'attività si sviluppa in un **unico compartimento** di 1500m², ma in termini di destinazione d'uso è necessario suddividerlo in zone omogenee.

Di seguito si individuano le zone fluidodinamiche omogenee dei locali.

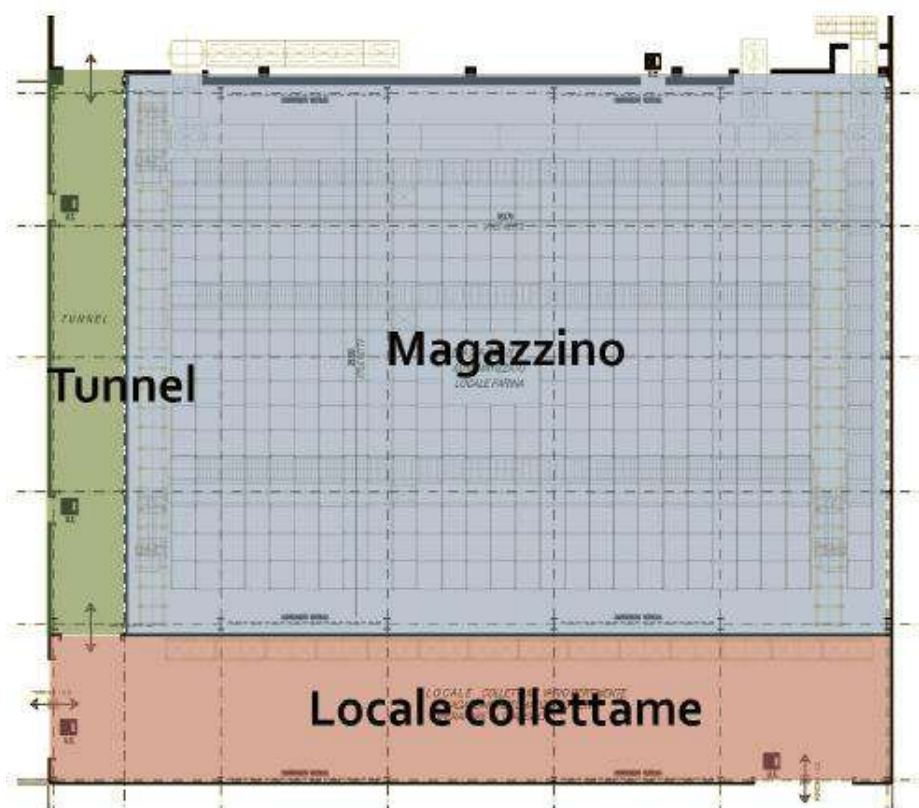


Figura 0.1-Planimetria locali

Magazzino

Porzione prevalente di fabbricato, caratterizzato da un elevato carico di incendio ed un'elevata altezza di impilamento. La gestione di deposito e di prelievo è comandata da una macchina automatizzata a gravità. Il locale ha un'altezza di circa 17m. Inoltre, la struttura confina su di un lato con un'altra attività, che s' intende proteggere da un eventuale collasso laterale in caso di incendio.

Locale collettame

Porzione di fabbricato, caratterizzato da un carico di incendio moderato e da una ridotta altezza di impilamento. La gestione di deposito e di prelievo è governata da operatori con carrelli elevatori. Il locale possiede un'altezza di circa 6.5m e non confina con un'altra attività.

Tunnel

Zona di transito tra il locale produttivo ed il locale collettame.

Di seguito si riporta il progetto strutturale del capannone in acciaio:

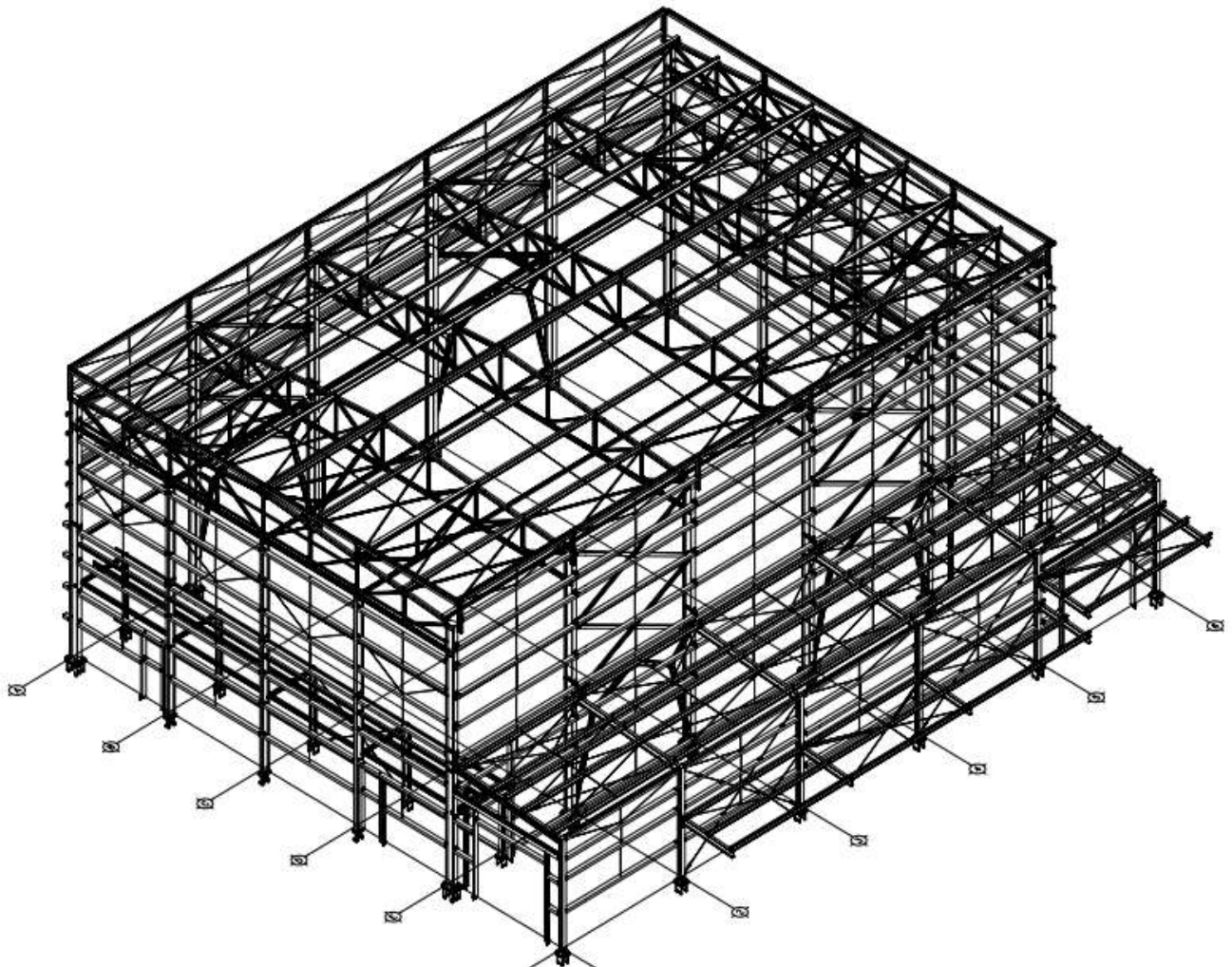
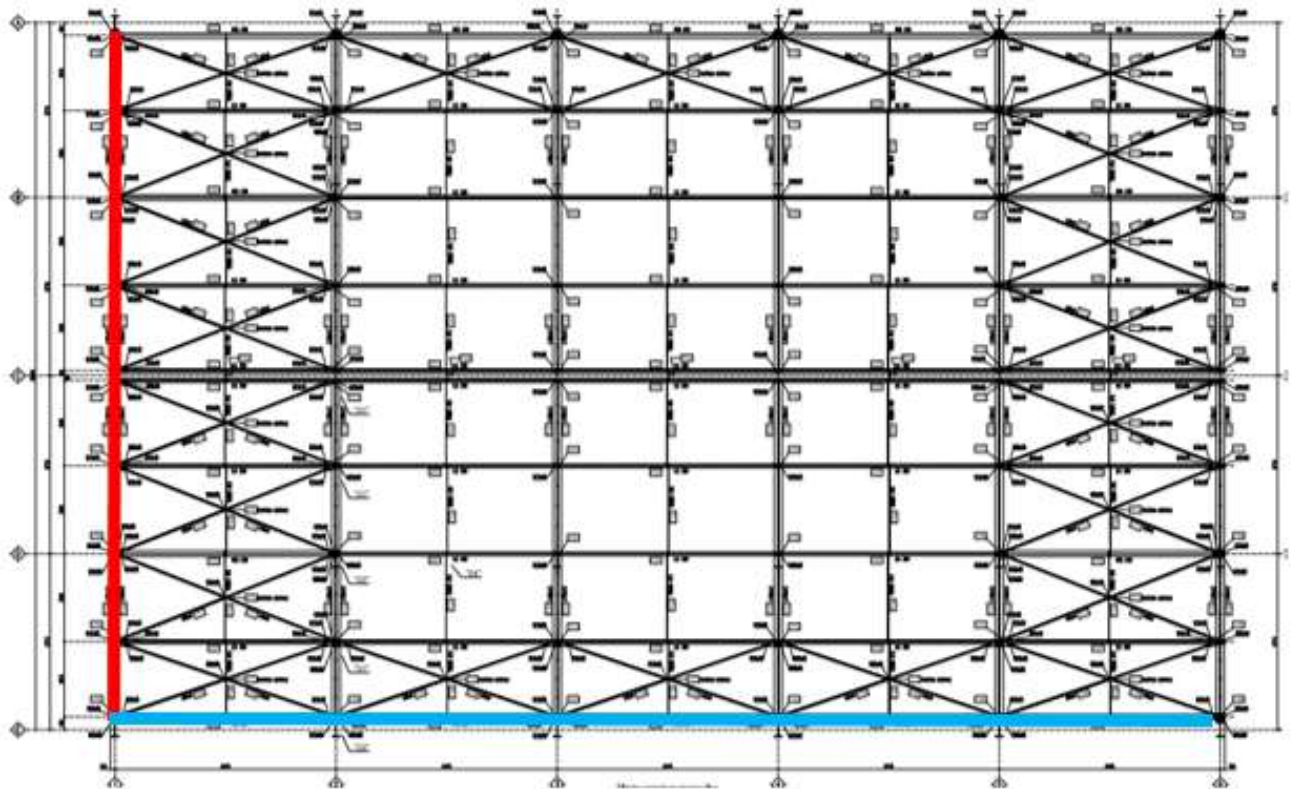
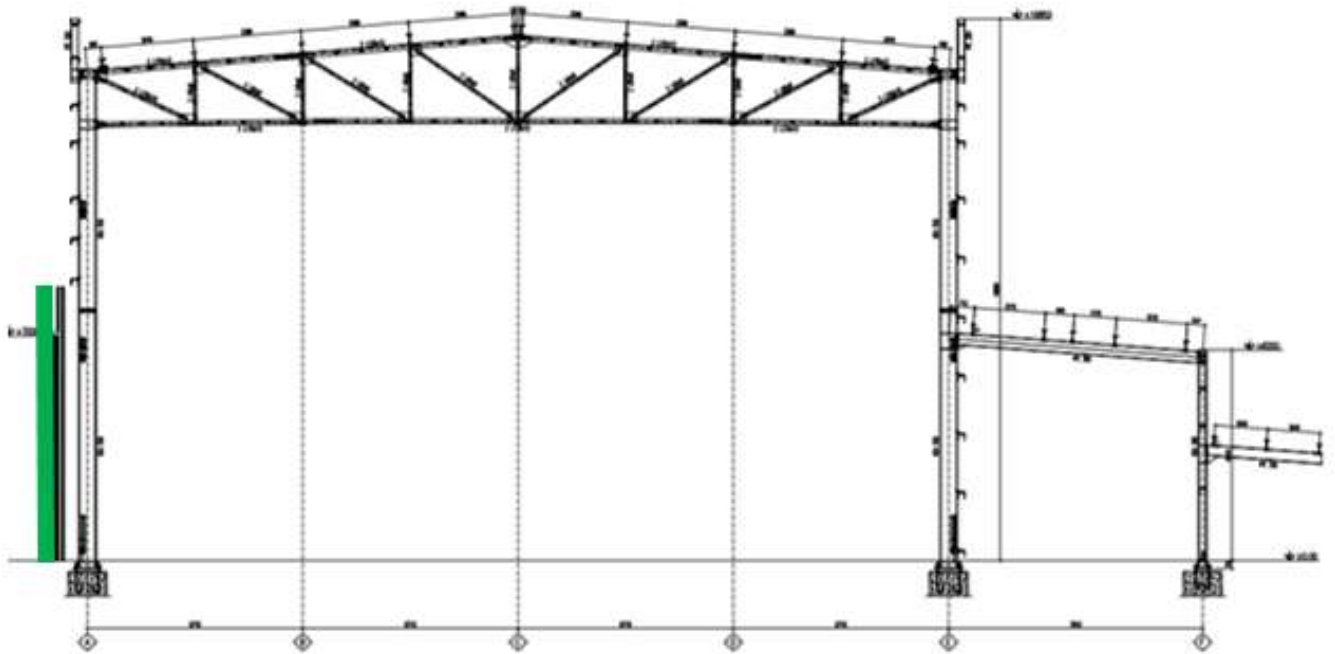


Figura 0.2-Struttura

Si evidenzia in verde l'edificio da proteggere appartenente ad un'altra proprietà:



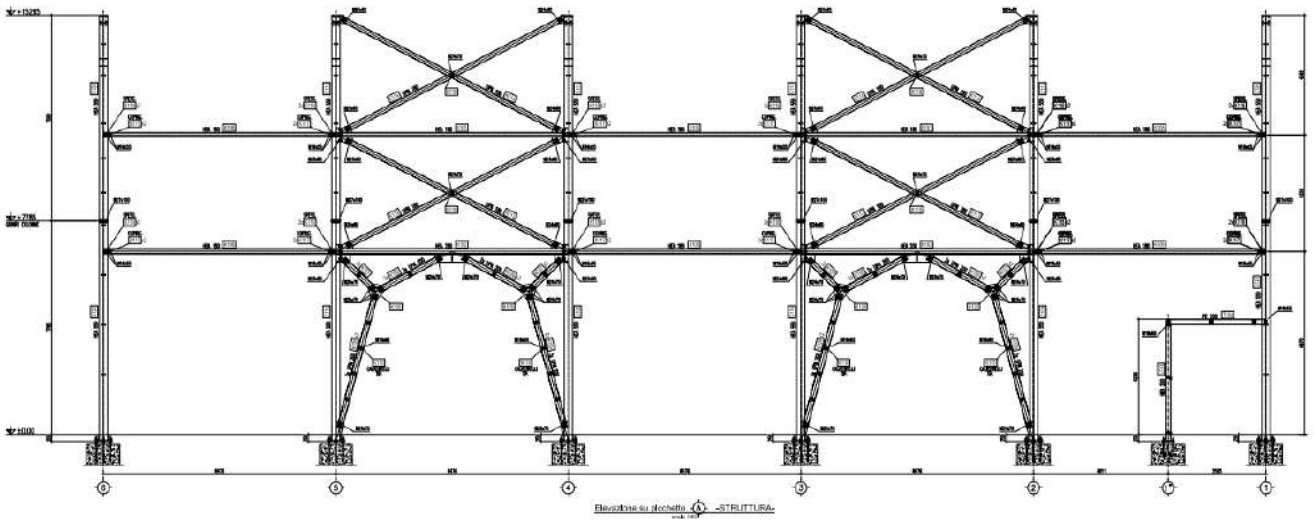
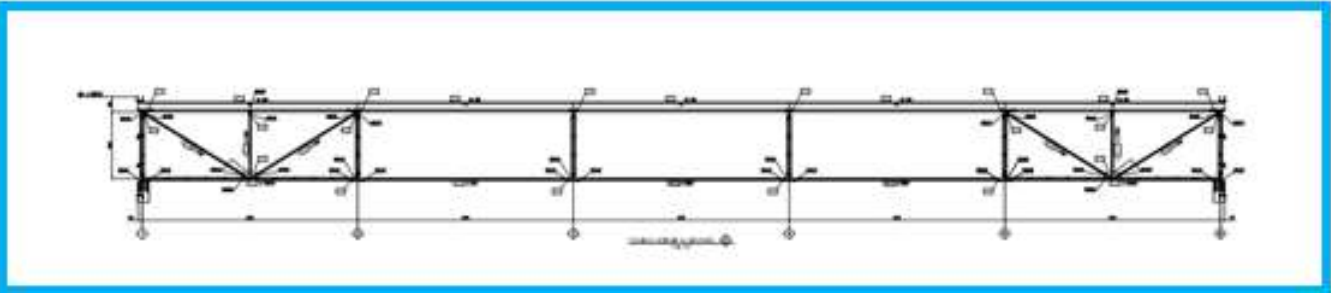
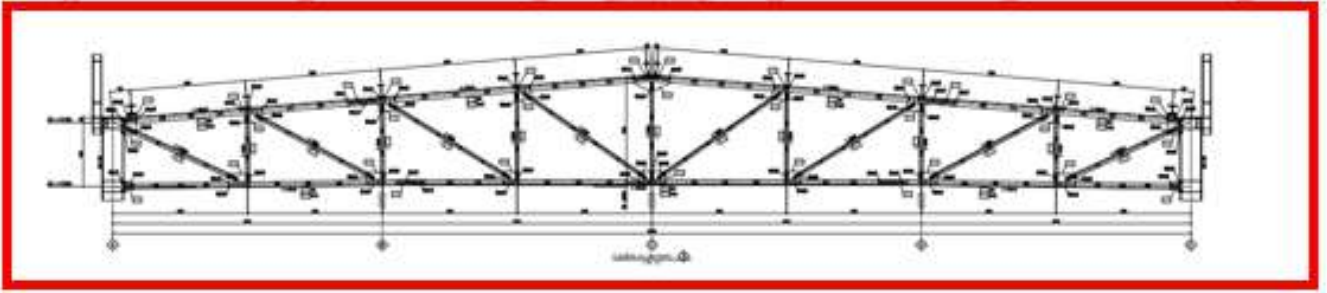


Figura 0.3-Particolari carpenteria

1 APPLICAZIONE DEL CODICE DI PREVENZIONE INCENDI

Il codice si applica per le attività soggette a controllo VVF – DPR n.151/2011:

N.	ATTIVITÀ	Cat. A	Cat. B	Cat. C
9	Officine e laboratori con saldatura e taglio dei metalli utilizzando gas infiammabili e/o comburenti > 5 addetti alla mansione specifica.		≤ 10 add.	> 10 add.
14	Officine o laboratori per verniciatura con vernici infiammabili e/o combustibili > 5 add.		≤ 25 add.	> 25 add.
27	Mulini per cereali e altre macinazioni con potenzialità giornaliera > 20 t; depositi di cereali e altre > 50 t		dep≤100 t	Mulini; dep.>100 t
28	Impianti essiccazione cereali e vegetali con depositi essiccato > 50 t			tutti
29	Stabilimenti ove si producono surrogati del caffè			tutti
30	Zuccherifici e raffinerie dello zucchero			tutti
31	Pastifici e/o riserie con produzione giornaliera > 50 t			tutti
32	Stabilimenti/impianti lavora/detiene foglia tabacco > 100 add. o > 50 t in ciclo/deposito			tutti
33	Stabilimenti/impianti produzione carta ... > 25 add. o > 50 t in lavorazione/deposito			tutti
34	Depositi carta, cartoni ..., archivi mat. cartaceo, biblioteche, dep. cer-nita carta usata, stracci cascami e fibre tessili per industria carta > 5 t		≤ 50 t	> 50 t
35	Stabilimenti, impianti, depositi ove si producono, impiegano e/o detengono carte fotografiche, ... pellicole cinematogr, radiogr. e fotogr. > 5 t (in lavorazione/deposito)		Dep.≤ 20 t	tutti

Figura 1.1-DPR151/2011

		Attività 27		
		Mulini per la macinazione di cereali e deposito		
N°	Materiale locale collettame Compartimento 2	Kg pallet	Quantità pallet	Totale massa kg
1	Sacchi (vuoti) carta farina	835	102	85170
2	Cartoni scatole	240	6	1440
3	Film plastico	735	3	2205
4	Interfalde cartone	565	6	3390
5	Pallet legno	25	600	15000
6	Pallet plastica	25	50	1250
7	Pallet legno	25	117	2925
			TOTc [kg]	111380

N°	Pallet pieni nel magazzino automatico Compartimento 1			
		N° Pallet	Peso pallet kg	Totale massa kg
8	Pallet 100x120 (farina)	375	1000	375000
9	Sacchi carta farina	375	5	1875
10	Pallet legno	375	25	9375
11	Interfalda cartone	375	0,4	150
12	Film pastico avvolgi sacchi	375	0,43	161,25
13	pallet 80x120	1750	1000	1750000
14	Sacchi carta farina	1750	5	8750
15	Pallet legno	1750	25	43750
16	Interfalda cartone	1750	0,4	700
17	Film pastico avvolgi sacchi	1750	0,43	752,5
18	Parziali pallet	85	600	51000
19	Sacchi carta farina	85	3	255
20	Pallet legno	85	25	2125
21	Interfalda cartone	85	0,3	25,5
22	Film pastico avvolgi sacchi	85	0,3	25,5
			TOTm [kg]	2243944,75

Tot [kg]	TOTc+TOTm		2355324,75	cat.2C
----------	-----------	--	------------	--------

Il codice si applica, in genere, a “attività soggette” non normate, di cat.B/C.

Inoltre, si applica ad attività nuove ed esistenti senza distinzione.

Il codice utilizza la metodologia dell’individuazione di livelli prestazionali (I,II,III,IV...), introdotta per la prima volta in Italia nel campo della resistenza al fuoco con il DM 9/3/2007, estendendola a tutte le altre “misure antincendio” con reazione al fuoco, compartimentazione, esodo, gestione della sicurezza, controllo dell’incendio.



Come noto, il DM 3 agosto 2015 possiede una struttura estremamente flessibile e prestazionale in fase di progettazione. La metodologia prevede, infatti, la valutazione del rischio incendio, che, oltre alla classica parte qualitativa, deve essere tradotta e riassunta in tre parametri fondamentali: R_{vita}, R_{beni} ed R_{ambiente}.

Una volta individuati, tali parametri accompagnano tutta la progettazione, in quanto sono fondamentali nell'attribuire i livelli di prestazione minimi richiesti alle singole strategie antincendio adottate.

Il deposito in oggetto è stato inquadrato con **R_{vita}: A3**, in quanto essendo attività lavorativa non aperta al pubblico. Gli occupanti presenti sono in stato di veglia e hanno familiarità con l'edificio e il rateo di crescita. In funzione della tipologia di materiale contenuto e dell'altezza di impilamento, può essere individuato come di tipo rapido **R_{beni}: 1**, in quanto non risulta essere un edificio né vincolato, né di tipo strategico, ed **R_{ambiente}**, poiché si è ritenuto mitigabile dall'applicazione di tutte le strategie antincendio individuate dal Codice.

2 RESISTENZA AL FUOCO S2

Si riportano in tabella i diversi livelli di prestazione attribuibili alle opere da costruzione:

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.

Figura 2.1-Livello di prestazione S2

Si riportano i criteri di attribuzione alle costruzioni dei singoli livelli di prestazione da raggiungere in fase progettuale:

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Opere da Costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate tutte le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> • compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti e strutturalmente separate da esse e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni ad altre opere da costruzione; • adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> ◦ R_{res} pari a 1; ◦ R_{antidive} non significativo; • non adibite ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto.
II	Opere da Costruzione o porzioni di opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate tutte le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> • compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti; • strutturalmente separate da altre opere da costruzione e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni alle stesse ovvero, in caso di assenza di separazione strutturale, tali che l'eventuale cedimento della porzione non arrechi danni al resto dell'opera da costruzione; • adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> ◦ R_{res} compresi in A1, A2, A3, A4; ◦ R_{res} pari a 1; ◦ R_{antidive} non significativo; • densità di affollamento non superiore a 0,2 persone/m²; • non prevalentemente destinate ad occupanti con disabilità; • aventi piani situati a quota compresa tra -5 m e 12 m.
III	Opere da costruzione non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV, V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

Figura 2.2-Livello di prestazione S2

Nel caso in esame, visti:

- I profili di rischio attribuiti;
- La separazione della struttura da opere adiacenti;



Figura 2.3-Distanza di separazione struttura adiacente

- Il collasso strutturale non capace di arrecare danno alle stesse;
- La densità di affollamento minore di 0.2 persone / m²;
- La non prevalente destinazione ad occupanti con disabilità;
- Il piano situato a quota 0.00m.

Si ricade nel **LIVELLO DI PRESTAZIONE II**.

Noto il livello di prestazione, è possibile intraprendere due percorsi progettuali.

Dunque, per la soluzione conforme per il livello di prestazione II:

1. Deve essere interposta una distanza di separazione su spazio a cielo libero verso le altre opere da costruzione come previsto per il livello di prestazione I.
2. Devono essere verificate le prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni in base agli incendi convenzionali di progetto come previsto al paragrafo S2.5
3. La classe minima di resistenza al fuoco deve essere pari almeno a 30 o inferiore, qualora consentita dal livello di prestazione III per il carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ del compartimento in esame.”

Si procede al calcolo del carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ del compartimento in esame:

Calcolo del carico di incendio specifico di progetto per soluzione CONFORME per individuare la resistenza R		
N°	Poteri calorifici H [MJ/kg]	carico protetto ψ
1	20	1
2	20	1
3	30	1
4	20	1
5	17,5	1
6	30	1
7	17,5	1
N°	TIPO PALLET	Poteri calorifici H [MJ/kg]
8	1	16,75
9		20
10		17,5
11		20
12		30
13	2	16,75
14		20
15		17,5
16		20
17		30
18	3	16,75
19		20
20		17,5
21		20
22		30

(il calcolo della classe di resistenza R₂₄₀ per i nodi di acciaio è stato effettuato mediante il software di calcolo in 1D)

n°	fattore combustione m	Area compartimento m ²	qf MJ/m ²	δq1	δq2	δqn
1	1	555	17054,00	1	1	1
2	1		20000			
3	1		6615,0			
4	1		6750,0			
5	0,8		21000,0			
6	1		3750,0			
7	0,8		4000,0			
			6431,641791	qf MJ/m ²		
						6431,641791
						R240

n°	carico protezione ψ	fattore combustione m	Area compartimento m ²	qf MJ/m ²	δq1	δq2	δqn
8	1	1	108,9	635,125,0	1	1	1
9	1	1		37500			
10	1	0,08		15,125			
11	1	1		30,00			
12	1	1		4,837,5			
13	1	1		2251,2500			
14	1	1		175,000			
15	1	0,8		612,500			
16	1	1		34,000			
17	1	1		22,575			
18	1	1		854,250			
19	1	1		51,00			
20	1	0,8		29,750			
21	1	1		5,10			
22	1	1	7,65				
				33483,909	qf MJ/m ²		
				3112,0895	qf MJ/m ²		
							33483,90951
							R240

Figura 2.4-Calcolo carico d'incendio

Si ottiene una classe di resistenza pari a R240. Essendo che il calcolo del carico d'incendio comporta una classe di resistenza maggiore rispetto a quella minima del livello prestazionale II, si decide di mantenere la classe R30.

La soluzione conforme in questo caso, non è comunque applicabile, in quanto non è soddisfatto il primo punto dei tre richiesti, ovvero la minima distanza di separazione su cielo libero tra strutture adiacenti.

Si passa, in tal modo, ad una soluzione alternativa, per cui:

“1. Sono ammesse soluzioni alternative, costituite da:

- a. compartimentazione rispetto ad altre costruzioni;
- b. assenza di danneggiamento ad altre costruzioni per effetto di collasso strutturale;
- c. mantenimento della capacità portante in condizioni di incendio per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione. La capacità portante deve essere comunque tale da garantire un margine di sicurezza t_{marg} (paragrafo M.3.2.2) non inferiore a 100% ·RSET e comunque non inferiore a 30 minuti.

2. Per la verifica della compartimentazione e dell'assenza di danneggiamento in caso di collasso strutturale, si utilizzano le soluzioni alternative previste per il livello di prestazione I di resistenza al fuoco.

3. Per la verifica del mantenimento della capacità portante in condizioni di incendio, le soluzioni alternative si ottengono verificando le prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni in base agli scenari di incendio di progetto ed ai relativi incendi convenzionali di progetto rappresentati da curve naturali di incendio secondo il paragrafo S.2.6.

4. Al fine di dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione il progettista deve impiegare uno dei metodi di cui al paragrafo G.2.6.”

3 MODELLAZIONE AVANZATA DI ESODO

Si effettua l'ipotesi di esodo di tipo simultaneo, e inoltre si dovrà modellare oltre al locale dove si individua l'incendio anche quelli adiacenti al fine di garantire l'esodo totale del compartimento. In questo caso specifico, la valutazione dell'RSET viene fatta non per la verifica al del sistema d'esodo in sé, ma per garantire il mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco della struttura per un tempo congruo a garantire l'esodo degli occupanti verso un luogo sicuro esterno.

RSET è determinato come la somma di varie componenti.

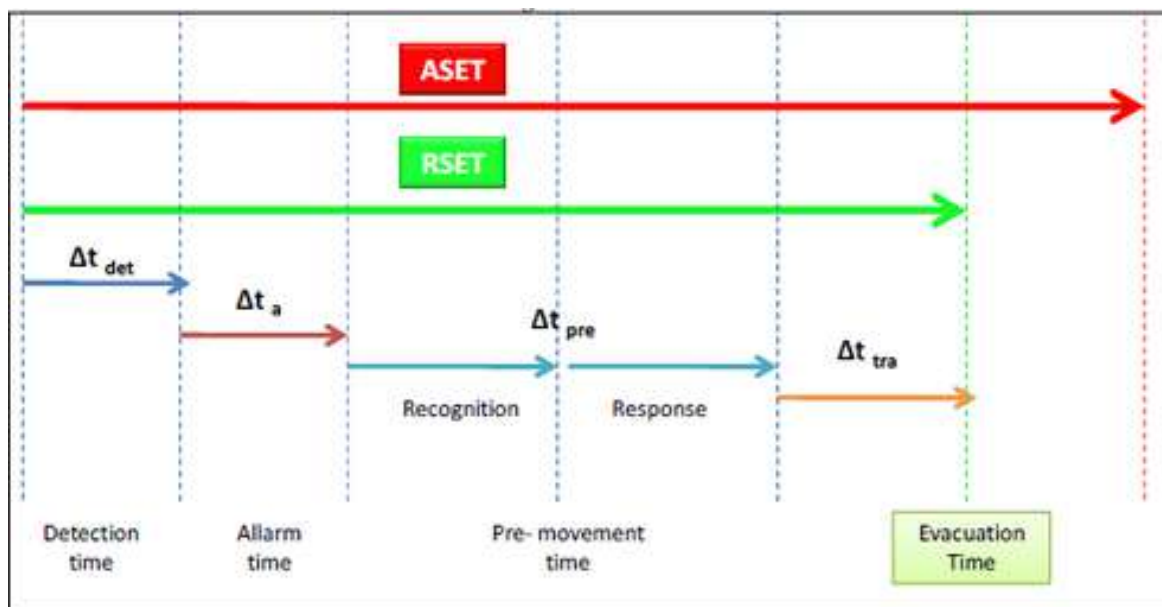


Figura 3.1-ASET e RSET

Tra le varie componenti individuiamo il tempo di rivelazione t_{det} , il tempo di allarme generale t_a , il tempo di pre-movimento t_{pre} , il tempo di movimento t_{tra} :

$$RSET = t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra}$$

Il t_{det} è il tempo necessario al sistema di rilevazione automatico per individuare l'incendio. Nel nostro caso:

$$t_{det} = 60s$$

Il tempo t_a è quello che intercorre tra la rilevazione e la diffusione dell'allarme di pericolo agli occupanti, considerando una rivelazione che attiva direttamente l'allarme generale dell'edificio:

$$t_a = 0s$$

Il tempo t_{pre} è il tempo necessario agli occupanti per svolgere una serie di attività che precedono il movimento vero e proprio verso il luogo sicuro. La letteratura indica che questa fase occupa spesso la maggior parte del tempo totale dell'esodo. Il valore di questo tempo è determinato in base a tre parametri caratterizzanti l'edificio:

- A1 qualità del sistema di allarme
- B2 complessità dell'edificio
- M2 qualità della gestione dell'emergenza in caso di incendio.

Con questi valori si individua:

$$t_{pre} = 180s$$

t_{tra} è il tempo impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro che attraverso un'analisi con modello idraulico, e considerando un affollamento sovrastimato rispetto la realtà del 100% si trova per 10 occupanti adulti con velocità di 1.2m/s

$$t_{tra} = 16s$$

$$RSET = t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra} = 256s$$

$$RSET + T_{Marg(100\%)} = 9 \text{ min}$$

Dunque, utilizzando la soluzione alternativa, il progettista è incaricato di verificare che la struttura abbia un collasso di tipo implosivo e che la capacità portante sia garantita per almeno 30 minuti essendo maggiore del tempo necessario all'esodo.

È da notare che, rispetto alla soluzione conforme, si utilizza la curva naturale d'incendio per quanto riguarda l'analisi termica. In questo caso, quindi, si tratta di 30 minuti dalla fase di ignizione.

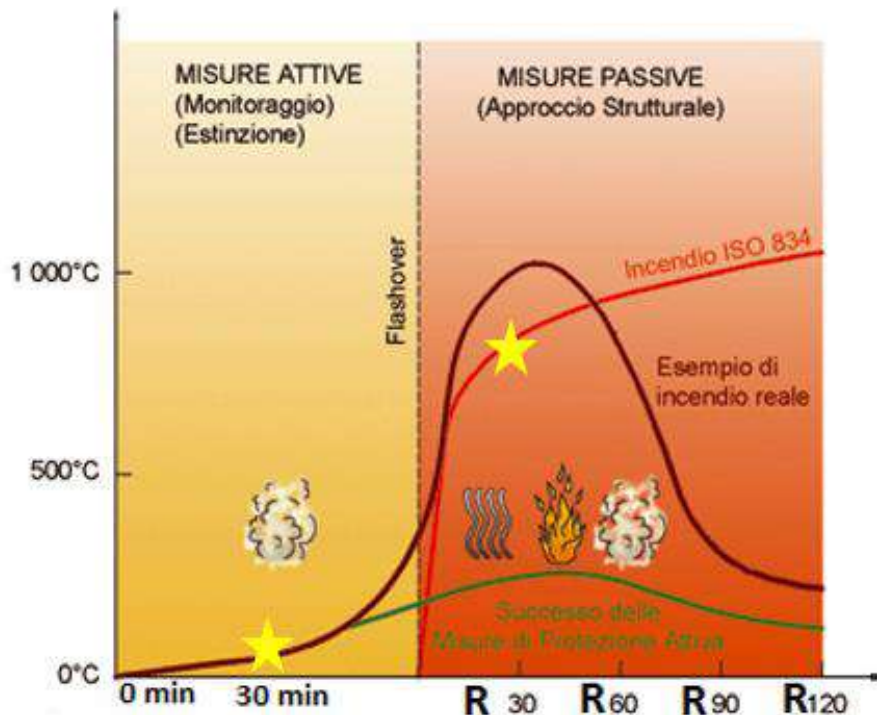


Figura 3.2-Differenze tra curva naturale d'incendio e curva ISO834

Nella soluzione conforme, si utilizza come curva di temperatura dei gas la ISO834. In questo caso, s'individuano classi di resistenza al fuoco, indicate con la lettera R (ad esempio R180). In quest'occasione, poiché la curva ISO834 parte dal flashover, si avranno temperature maggiori e maggiori tempi di resistenza al fuoco da verificare.

A titolo di studio, si proseguirà la tesi analizzando i seguenti punti:

- Studio di un telaio semplice senza imperfezioni in soluzione conforme;
- Studio di un telaio semplice con imperfezioni in soluzione conforme;
- Studio della struttura nella sua globalità senza imperfezioni in soluzione conforme;
- Studio della struttura nella sua globalità con imperfezioni in soluzione conforme;
- Individuazione degli scenari d'incendio e analisi per l'ottenimento della curva naturale d'incendio;
- Studio della struttura nella sua globalità con imperfezioni in soluzione alternativa;

- Verifica delle membrature maggiormente sollecitate in soluzione alternativa con struttura imperfetta e adeguamento della medesima per il raggiungimento del collasso implosivo;
- Confronto tra soluzioni.

Durante i seguenti punti, si utilizzerà il software FEM Strauss7 per soluzioni conformi e alternative di tipo avanzato, come previsto negli Eurocodici.

Tale software è consigliato dal Codice nella sezione M:

M.1.9

Criteri di scelta e d'uso dei modelli e dei codici di calcolo

1. Il professionista antincendio può optare tra i modelli di calcolo che le conoscenze tecniche di settore mettono a disposizione, sulla base di valutazioni inerenti la complessità del progetto.
2. Il professionista antincendio che adotta modelli di calcolo sofisticati, deve possedere una particolare competenza nel loro utilizzo, nonché un'approfondita conoscenza sia dei fondamenti teorici che ne sono alla base che della dinamica dell'incendio.
3. Allo stato attuale i modelli più frequentemente utilizzati sono:
 - a. modelli analitici,
 - b. modelli numerici tra cui:
 - i. modelli di simulazione dell'incendio a zone per ambienti confinati,

Nota Ad esempio, codici di calcolo CFAST, Ozone.

ii. modelli di simulazione dell'incendio di campo,

Nota Ad esempio, codici di calcolo CFX, FDS, Fluent.

iii. modelli di simulazione dell'esodo,

Nota Ad esempio, codice di calcolo FDS+EVAC.

iv. modelli di analisi termostutturale.

Nota Ad esempio, codici di calcolo Abaqus, Adina, Ansys, Diana, Safir, Strauss..

4. Nel loro campo di applicazione, i modelli analitici garantiscono stime accurate di effetti specifici dell'incendio (es. il calcolo del tempo di *flashover* in un locale). Per analisi più complesse che coinvolgano interazioni dipendenti dal tempo di più processi di tipo fisico e chimico presenti nello sviluppo di un incendio si ricorre generalmente ai modelli numerici.

Relativamente a questo tipo di soluzione, l'Eurocodice, nella parte riguardante il fuoco, raccomanda che *i metodi di calcolo avanzati comprendano modelli di calcolo separati per la determinazione di:*

- *Sviluppo e distribuzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali (modello di risposta termica)*
- *Comportamento meccanico della struttura o di una qualsiasi parte della stessa (modello di risposta meccanica)*

Inoltre nei capitoli precedenti è stata *effettuata una verifica dell'accuratezza dei modelli di calcolo sulla base di specifici risultati di prova.*

Inoltre purché siano utilizzate le relazioni tensione – deformazione fornite nella sezione 3 non è necessario considerare esplicitamente gli effetti del creep termico transiente.

Nello studio della struttura imperfetta per l'analisi di elementi verticali isolati si utilizza un'imperfezione iniziale sinusoidale con valore massimo di $h/1000$ a metà altezza.

4 TELAIO PERFETTO

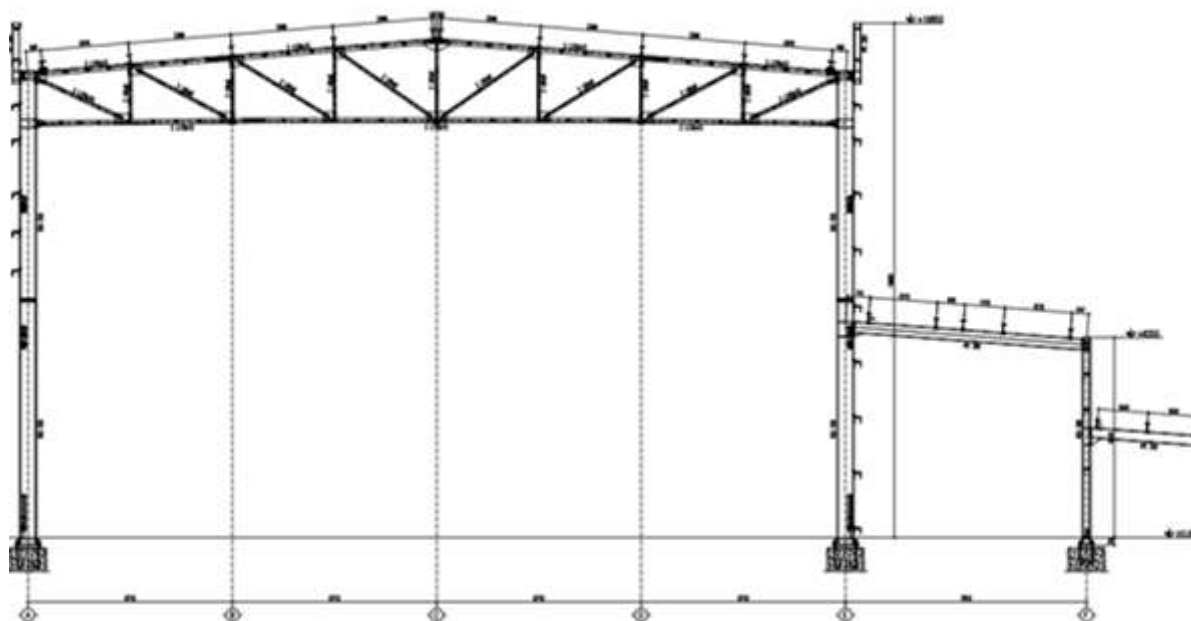
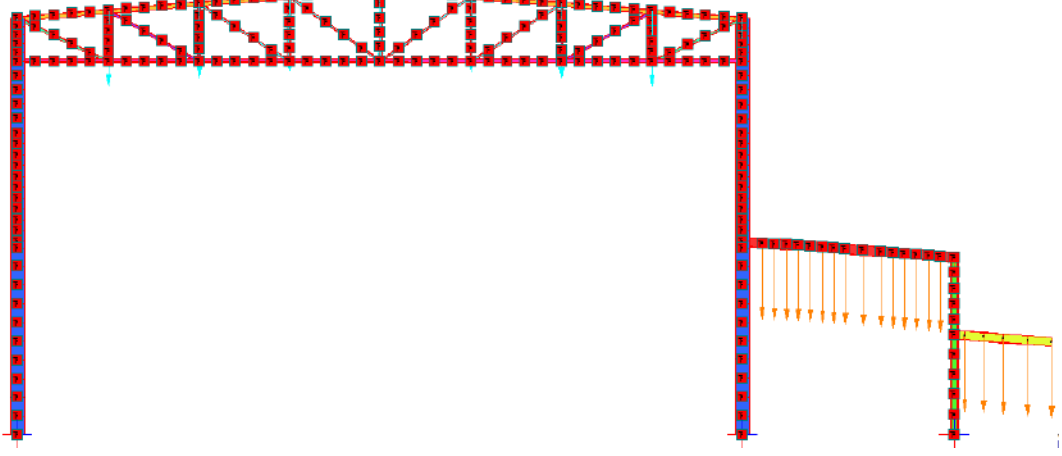
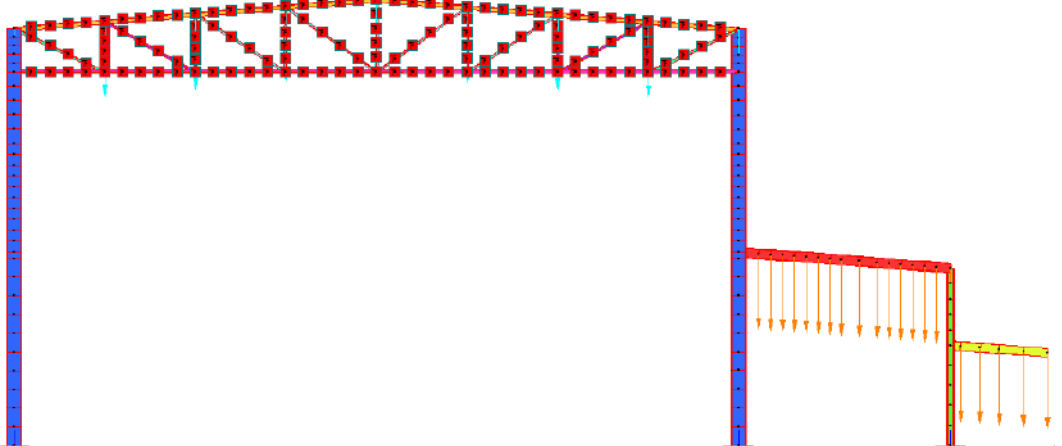
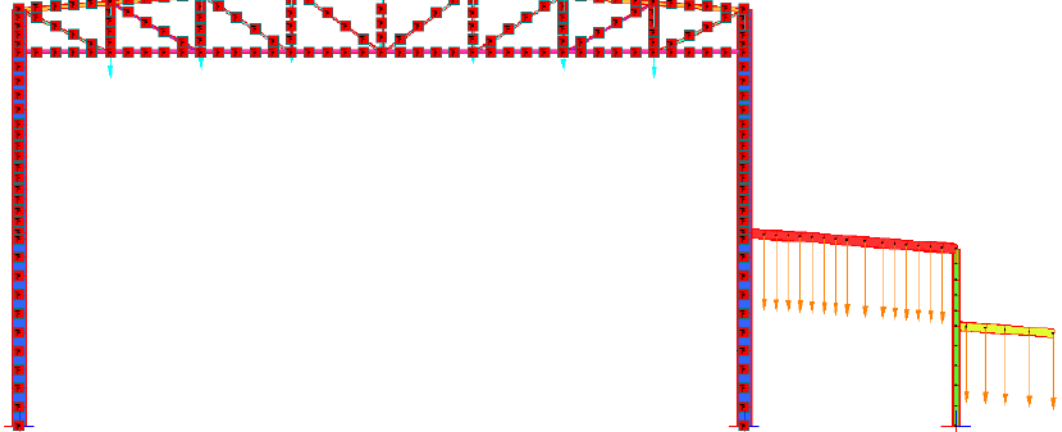
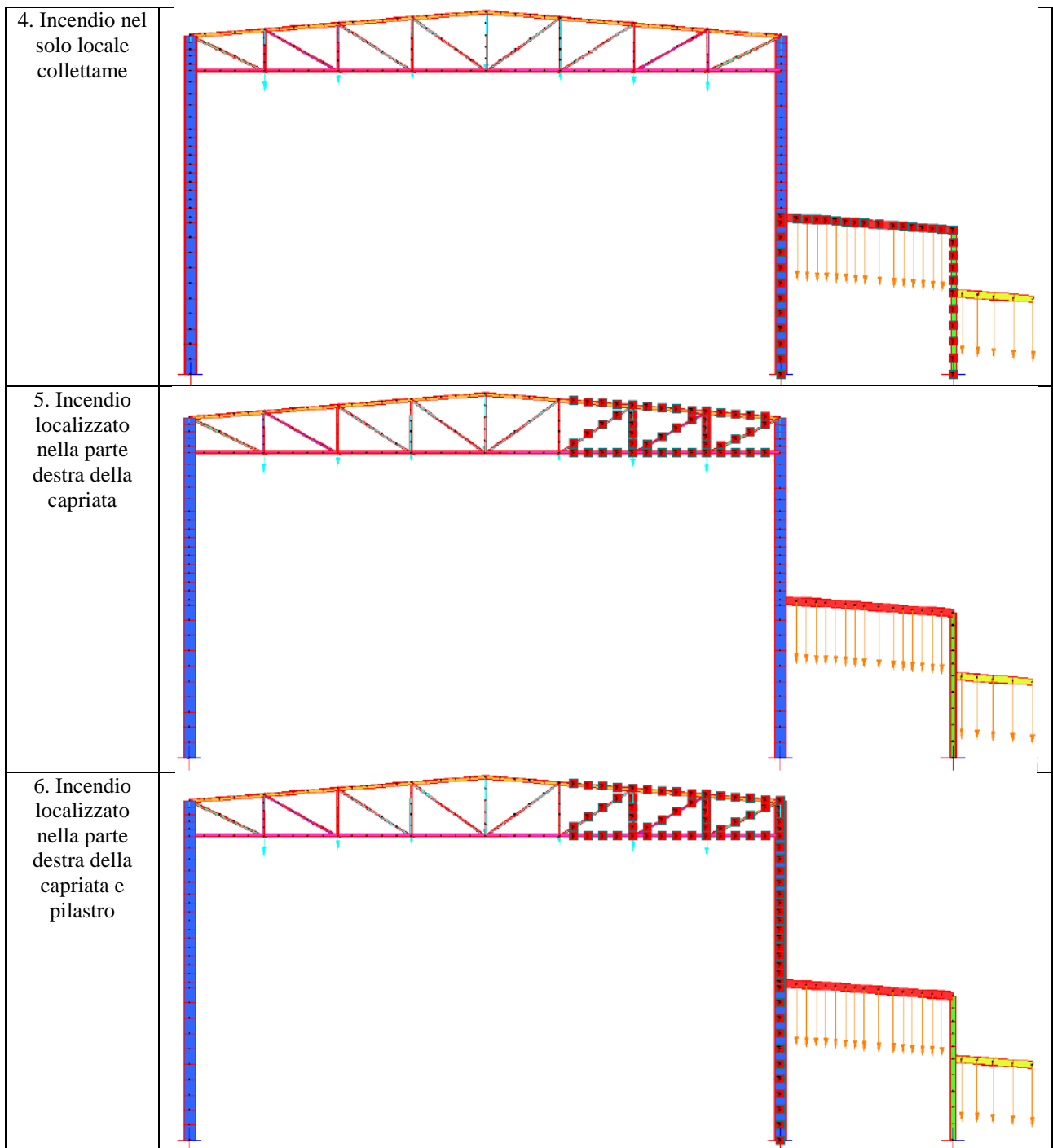
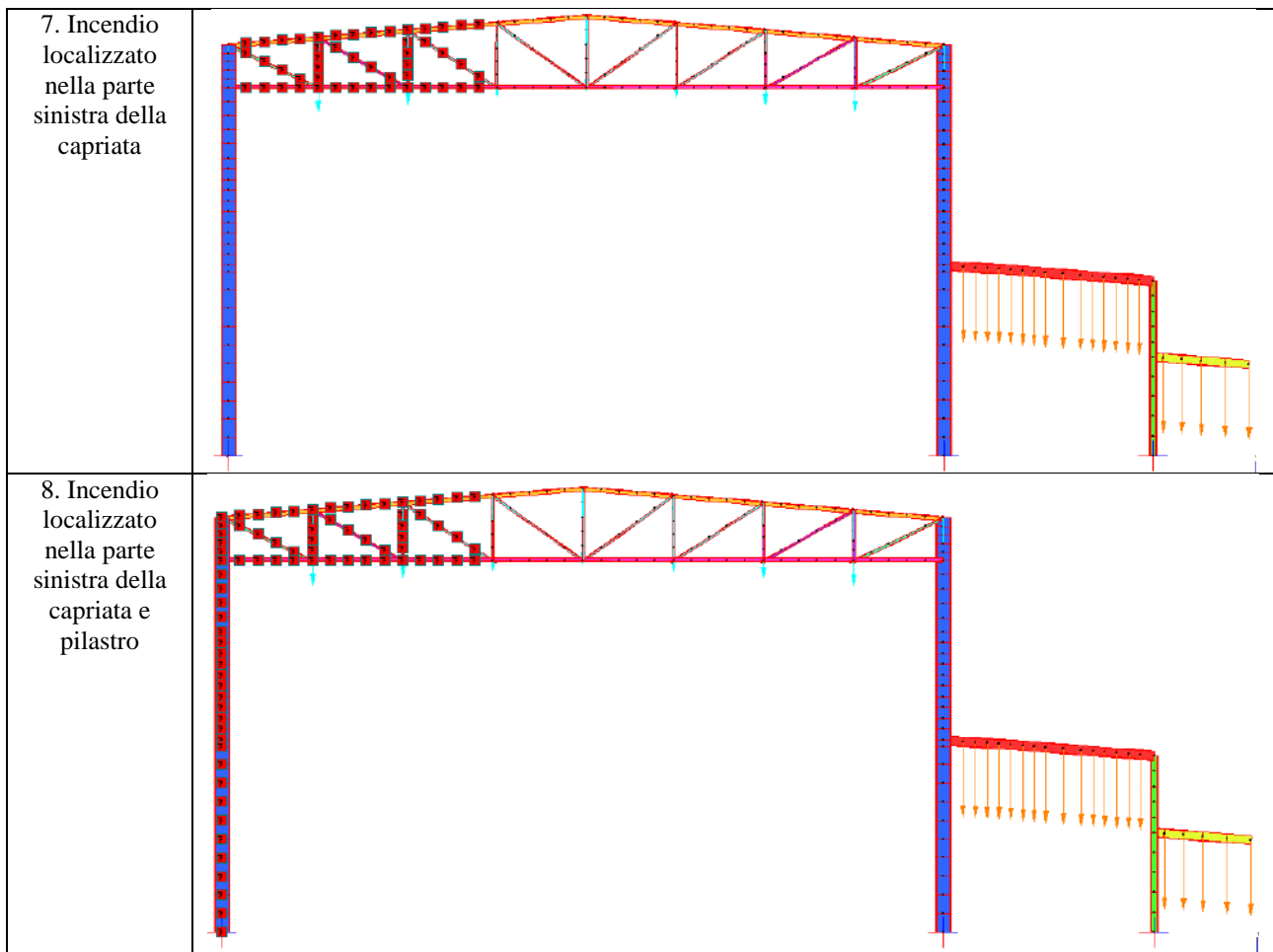


Figura 4.1-Telaio

Si analizza il comportamento della seguente sottostruttura per otto differenti scenari di incendio:

Scenario	Configurazione
1. Incendio generalizzato	
2. Diffuso su tutta la capriata	
3. Incendio diffuso su tutto il magazzino	





Si sono scelti otto scenari al fine d'individuare quale fosse il caso in cui la struttura fosse maggiormente sollecitata e propensa ad un collasso verso l'esterno e non di tipo implosivo. Una volta individuato il caso più gravoso, verrà analizzato per l'intera struttura con lo scopo di verificare sia il collasso implosivo, che il mantenimento della capacità portante per un tempo adeguato agli standard di progettazione.

In tutti gli scenari, si utilizzano le seguenti condizioni al contorno:

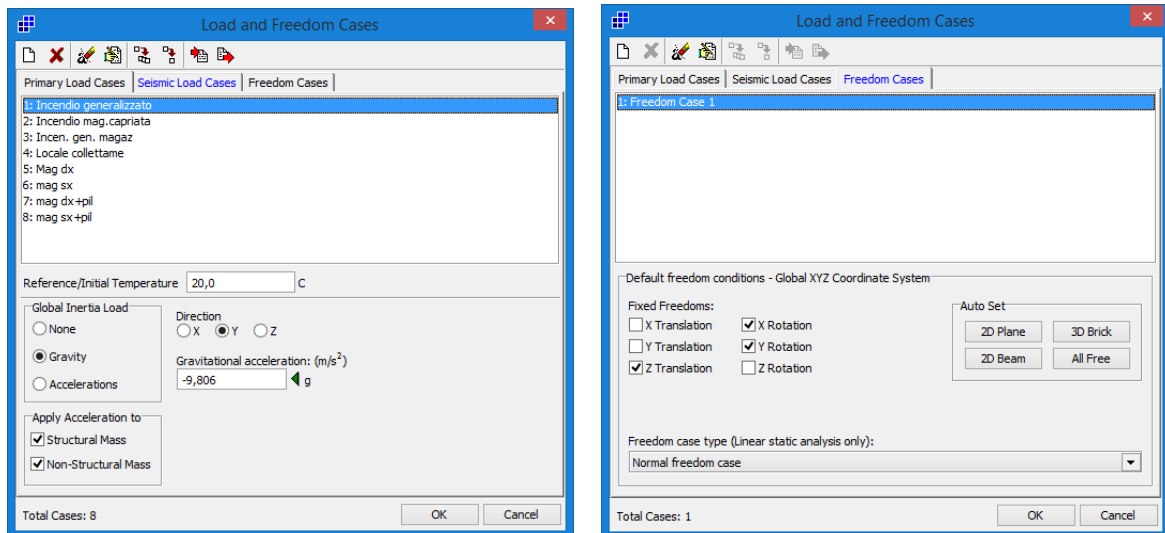


Figura 4.2-Settaggi Straus7

- Curve di riscaldamento per i diversi profili (calcolate precedentemente)
- Caratteristiche termiche e meccaniche variabili con la temperatura. (Unifilari della struttura in allegato 1)

Primo step, comune a tutti gli scenari, è quello di eseguire un'analisi statica per individuare la deformazione al tempo iniziale a cui è assoggettata la struttura. Questa sarà utilizzata come controllo della soluzione quasi statica al tempo $t=1s$.

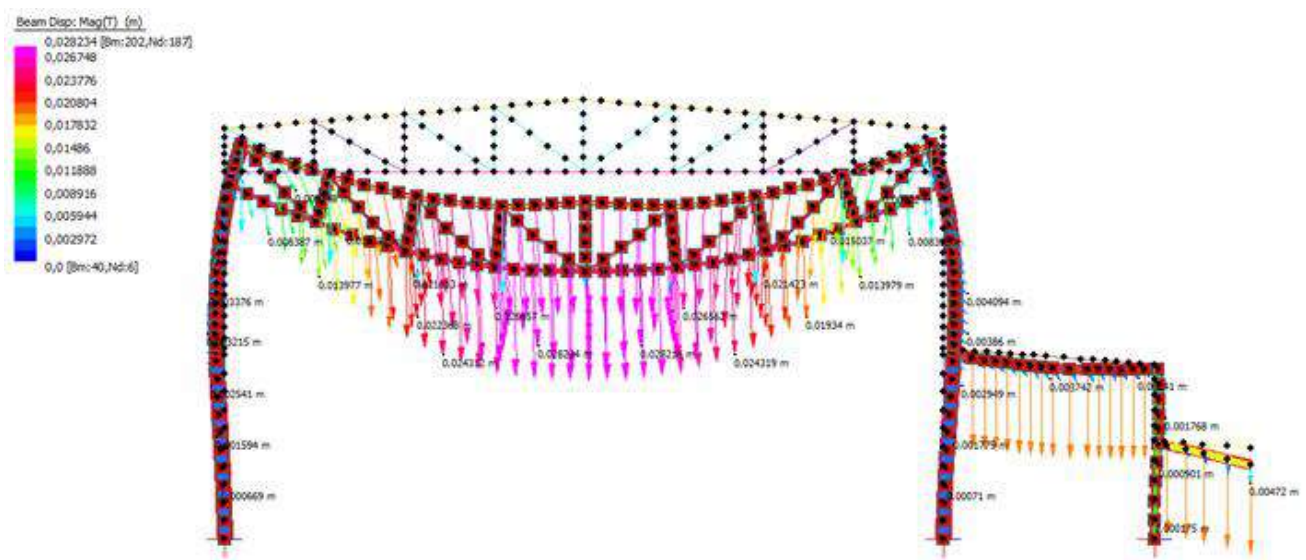


Figura 4.3-Campo degli spostamenti

Si ha una freccia massima della capriata pari a 0.0282 m.

Successivamente, per ogni scenario, si esegue prima un'analisi termica transiente e poi un'analisi quasi statica. L'analisi generale si protrae per un periodo pari a 1000s e si riporteranno i risultati al collasso e ad ogni 200s di analisi.

Per ogni scenario, si utilizzano i medesimi nodi di controllo per analizzare l'andamento della deformata e individuare il limite di superamento della deformazione massima convenzionale, oppure uno svio della struttura che rappresenta il collasso (ovvero la soluzione non arriva a convergenza, come in figura per lo scenario 1)

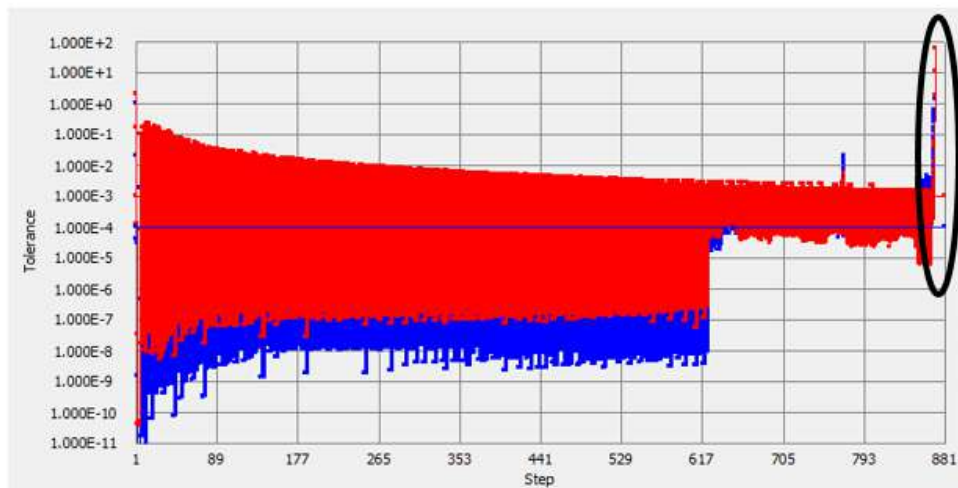
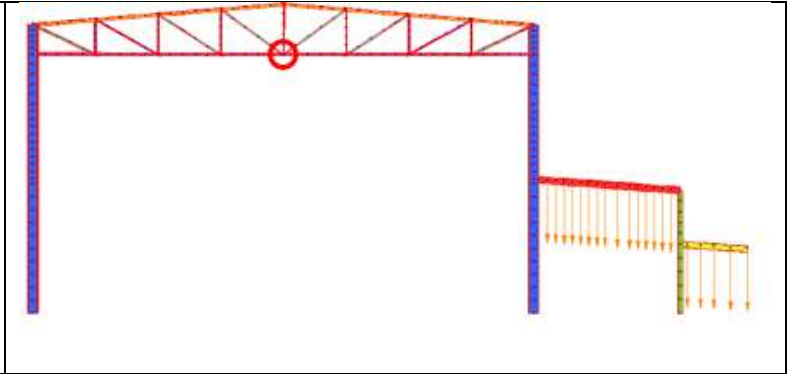


Figura 4.4-Analisi di convergenza

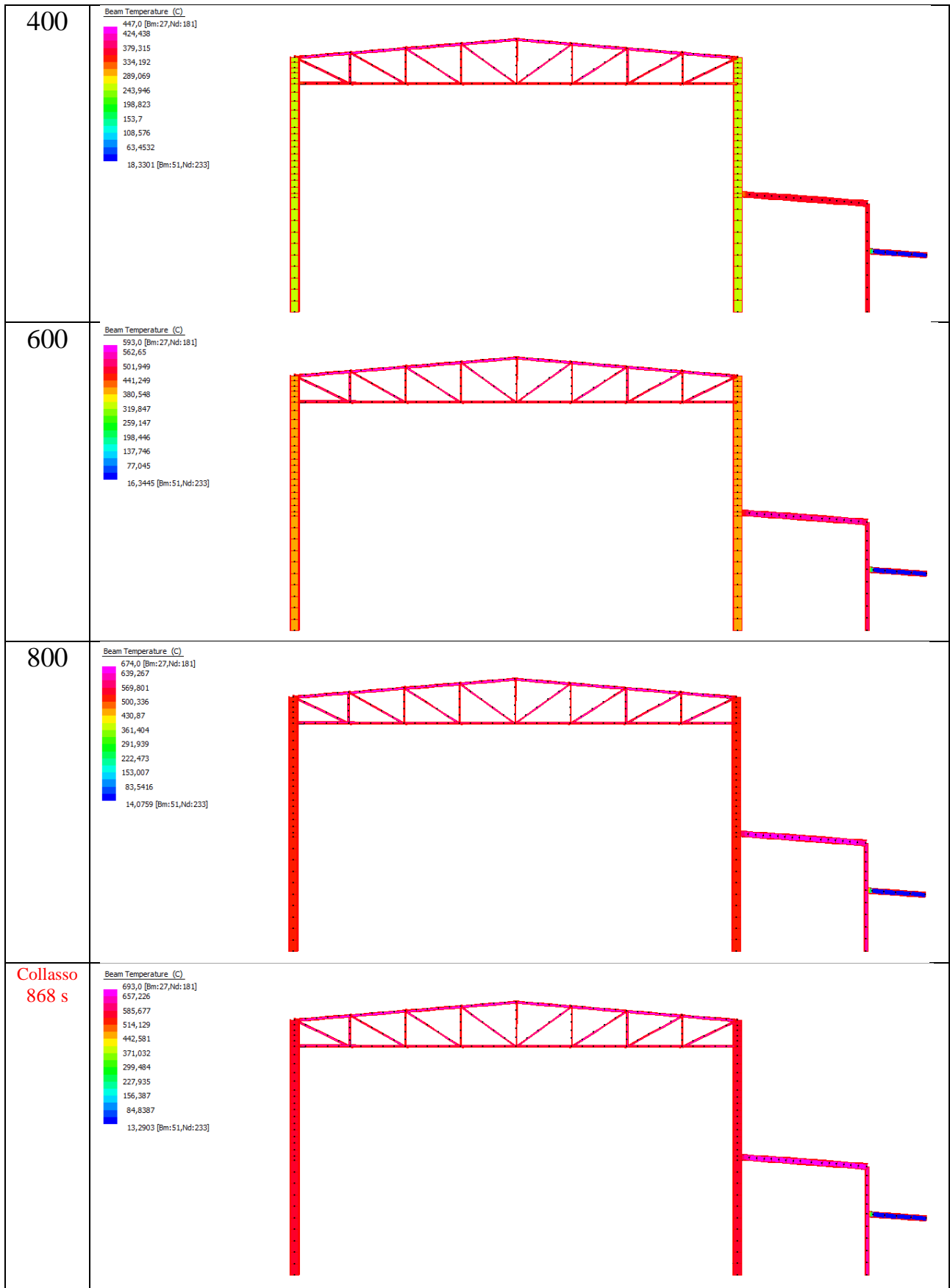
Punti di controllo	
Deformazione massima convenzionale [m]	Nodo
$D_{x,max -1} = 0.50$ [m]	
$D_{x,max -5} = 0.50$ [m]	

$D_{y,max-14} = 0.90 \text{ [m]}$

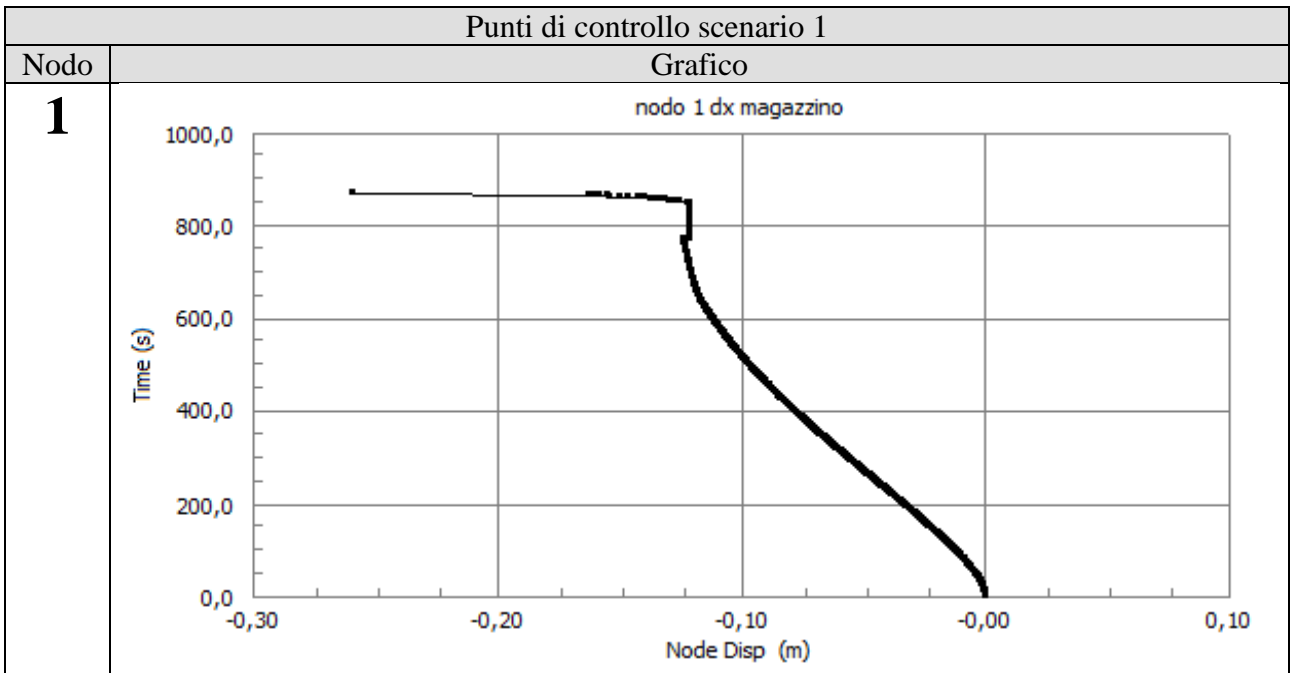
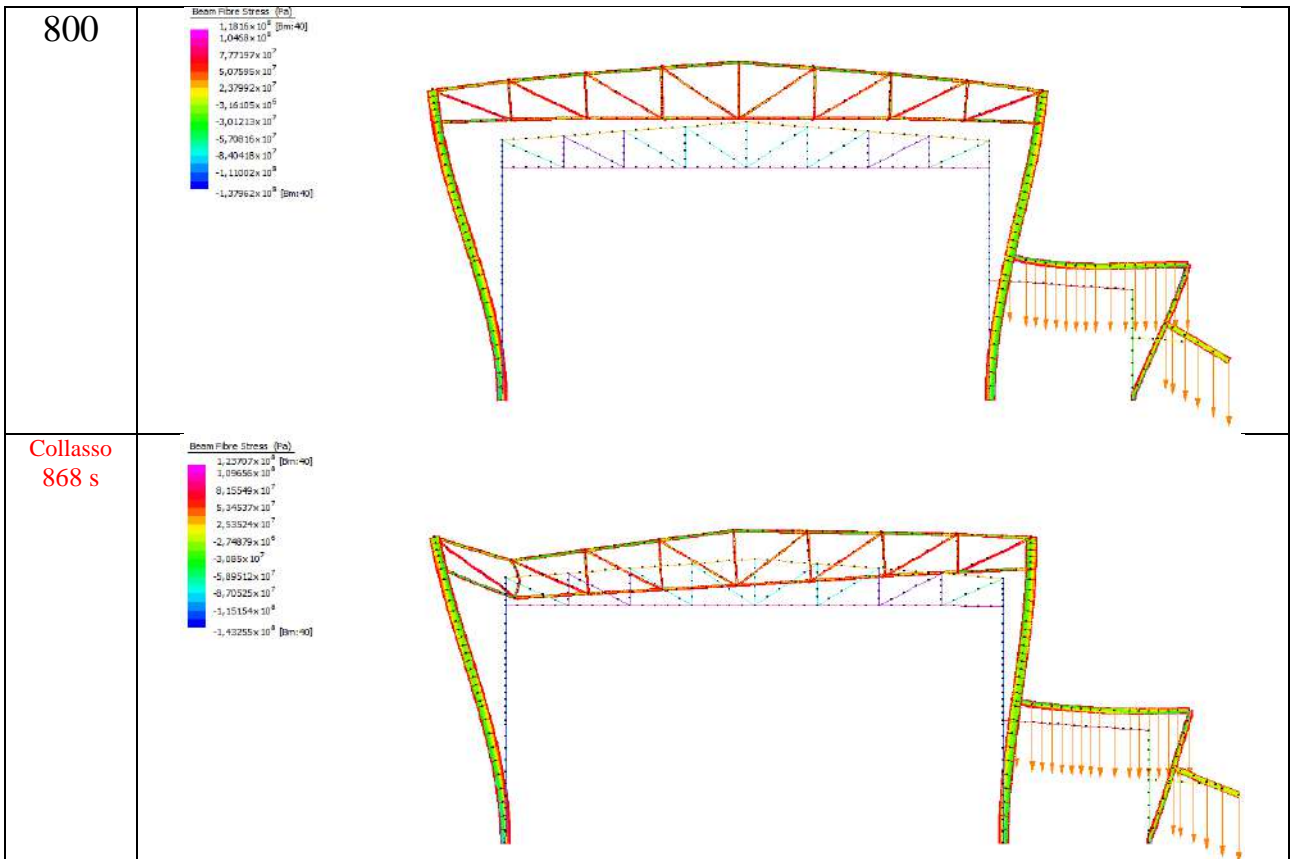


SCENARIO 1 – INCENDIO GENERALIZZATO

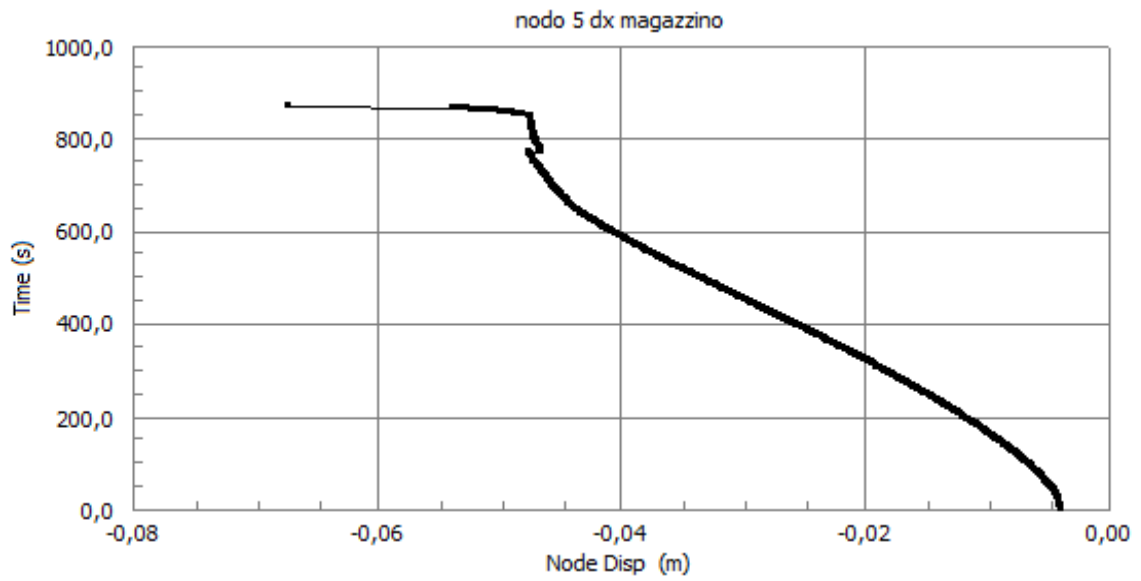
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C) 20,0 [Bm:51,Nd:233] 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 [Bm:247,Nd:36]</p>
200	<p>Beam Temperature (C) 216,0 [Bm:27,Nd:18-1] 205,665 184,996 164,326 143,656 122,987 102,317 81,6476 60,978 40,3084 19,6388 [Bm:51,Nd:233]</p>



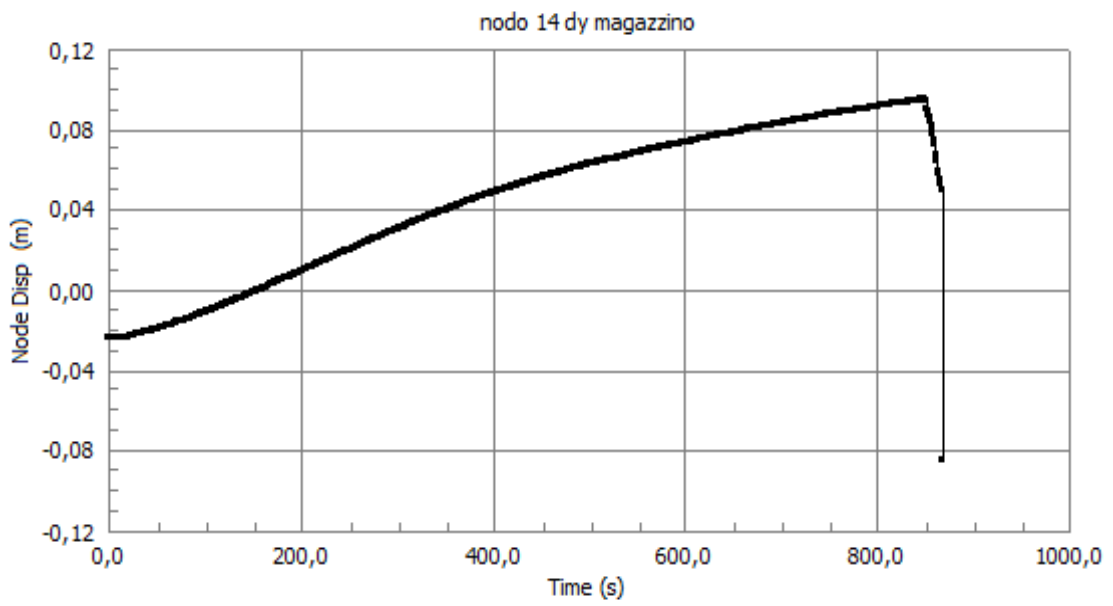
Analisi Meccanica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p>5.99972 × 10¹⁰ [Bm:162] 5.36848 × 10¹⁰ 5.05108 × 10¹⁰ 4.81838 × 10¹⁰ 3.08767 × 10¹⁰ 1.65582 × 10¹⁰ 2.24063 × 10¹⁰ -1.20078 × 10¹⁰ -2.63945 × 10¹⁰ -4.0712 × 10¹⁰ -5.50296 × 10¹⁰ [Bm:152]</p>
200	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p>7.99883 × 10¹⁰ [Bm:162] 7.23518 × 10¹⁰ 5.7079 × 10¹⁰ 4.18062 × 10¹⁰ 2.65333 × 10¹⁰ 1.12605 × 10¹⁰ -4.01235 × 10¹⁰ -1.02852 × 10¹⁰ -3.4938 × 10¹⁰ -4.88309 × 10¹⁰ -6.61027 × 10¹⁰ [Bm:42]</p>
400	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p>1.22805 × 10¹¹ [Bm:42] 1.08443 × 10¹¹ 8.12718 × 10¹⁰ 5.499 × 10¹⁰ 2.82836 × 10¹⁰ -1.53723 × 10¹⁰ -2.51892 × 10¹⁰ -5.19156 × 10¹⁰ -7.8642 × 10¹⁰ -1.03308 × 10¹¹ -1.32095 × 10¹¹ [Bm:42]</p>
600	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p>1.66273 × 10¹¹ [Bm:42] 1.49909 × 10¹¹ 1.13181 × 10¹¹ 7.64524 × 10¹⁰ 3.97242 × 10¹⁰ 2.99606 × 10¹⁰ -3.37321 × 10¹⁰ -7.04002 × 10¹⁰ -1.07188 × 10¹¹ -1.43817 × 10¹¹ -1.80645 × 10¹¹ [Bm:42]</p>



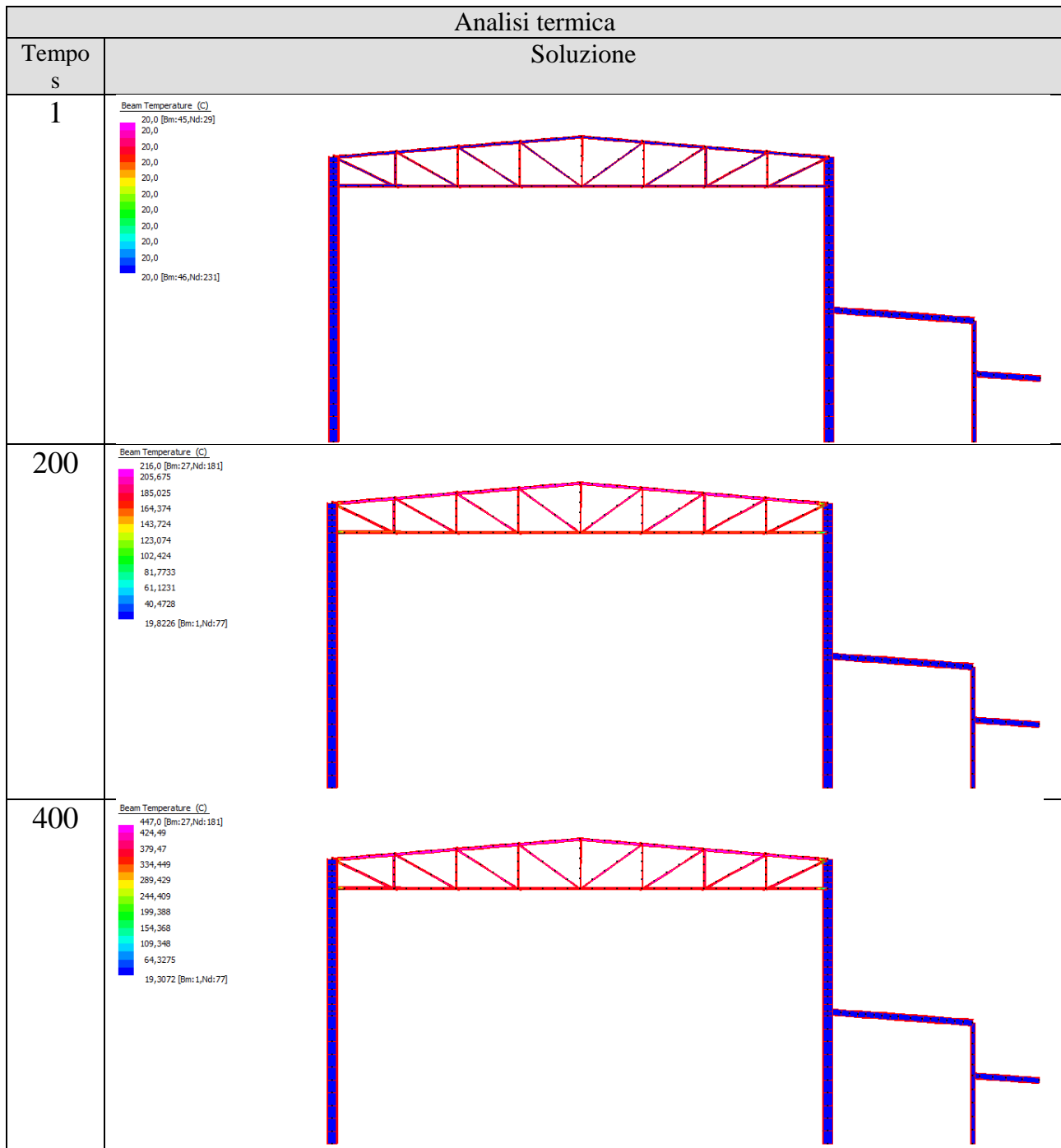
5

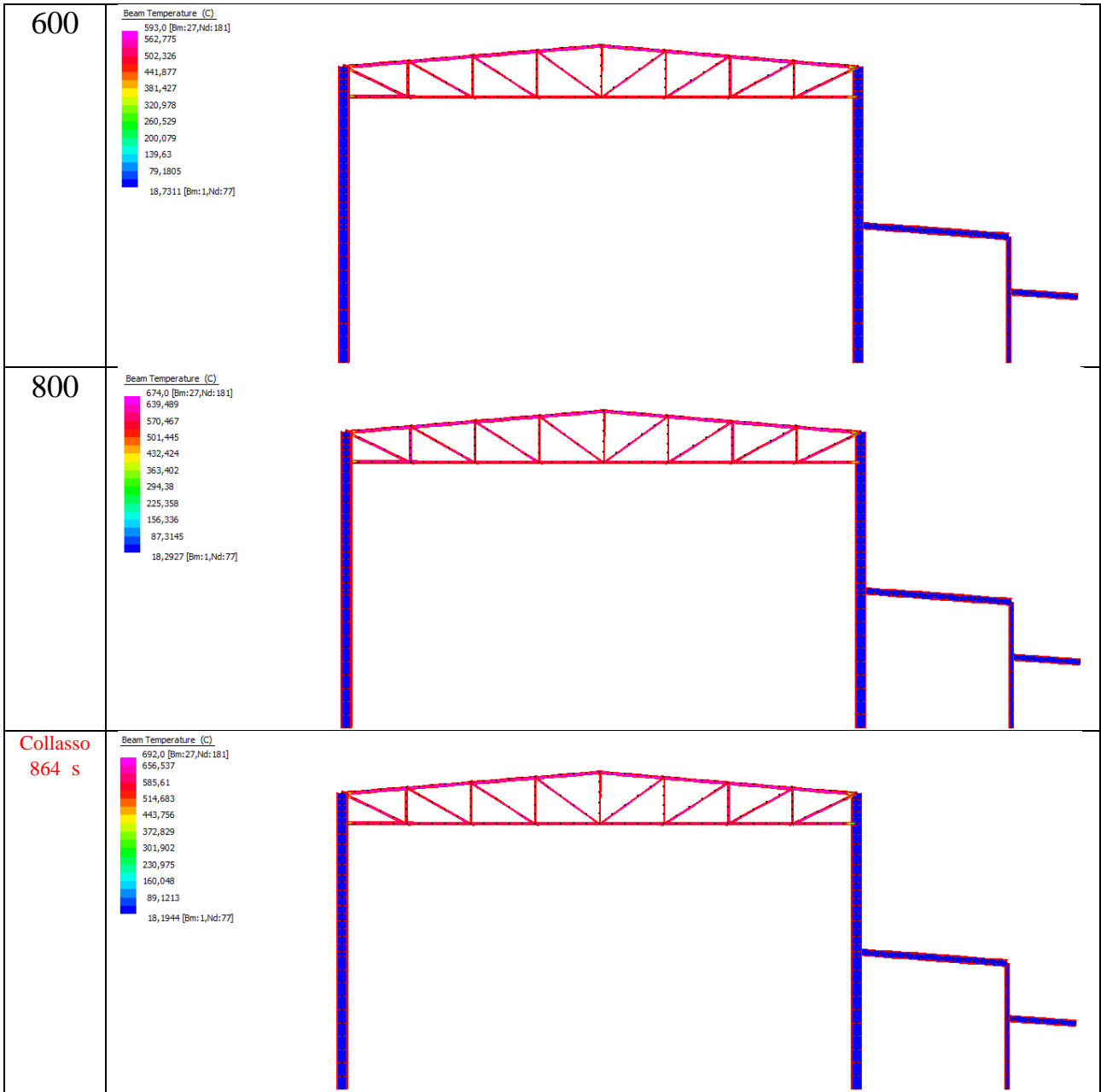


14



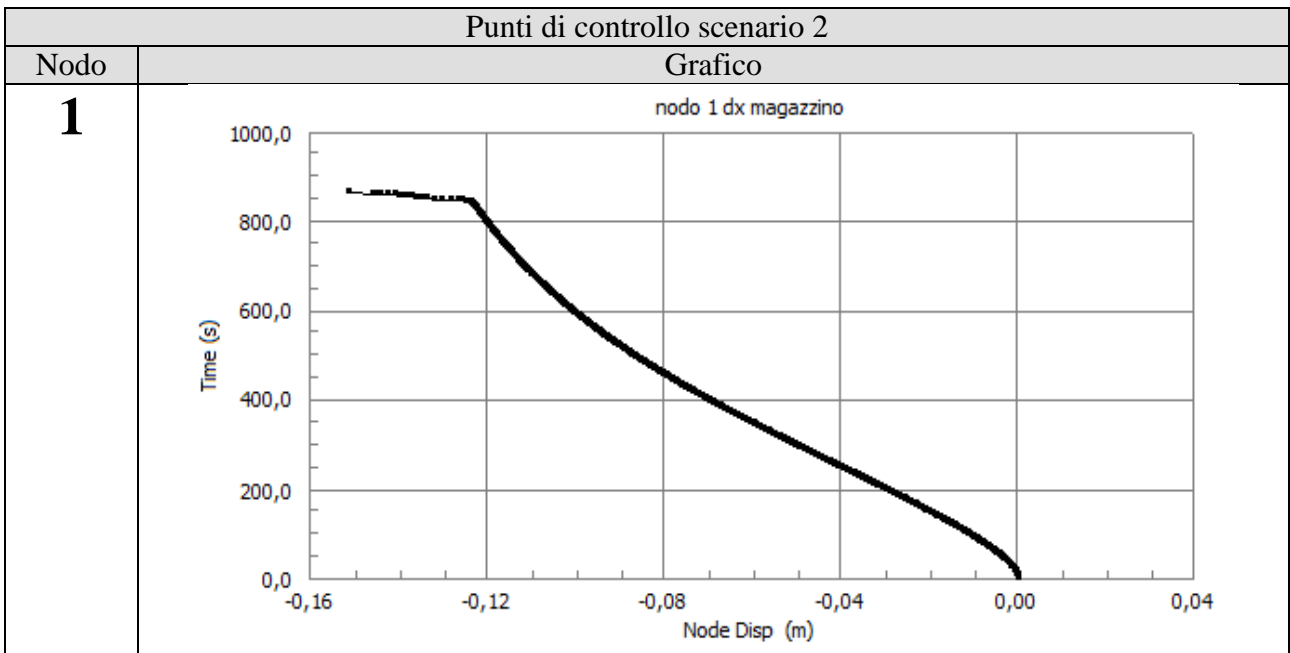
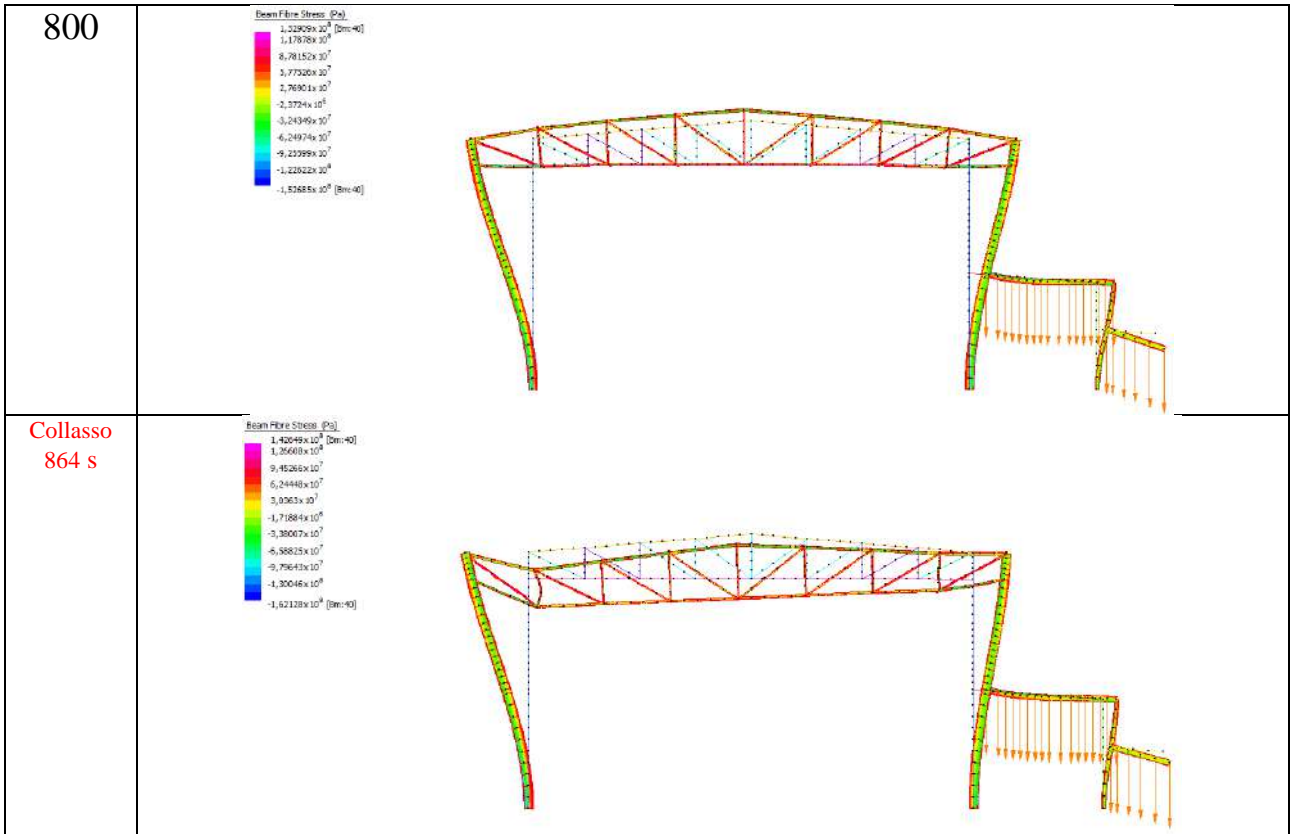
SCENARIO 2 – DIFFUSO SU TUTTA LA CAPRIATA

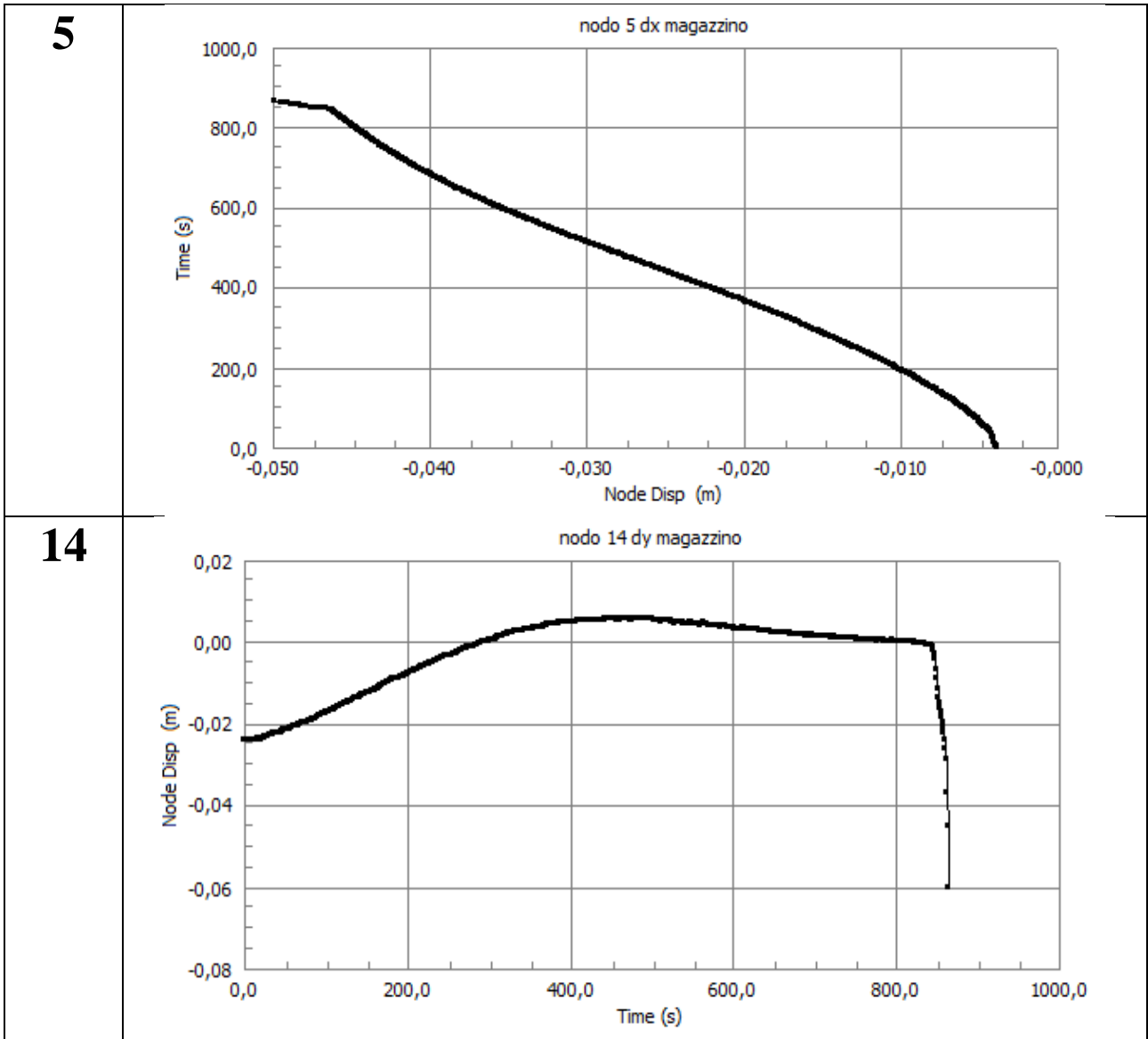




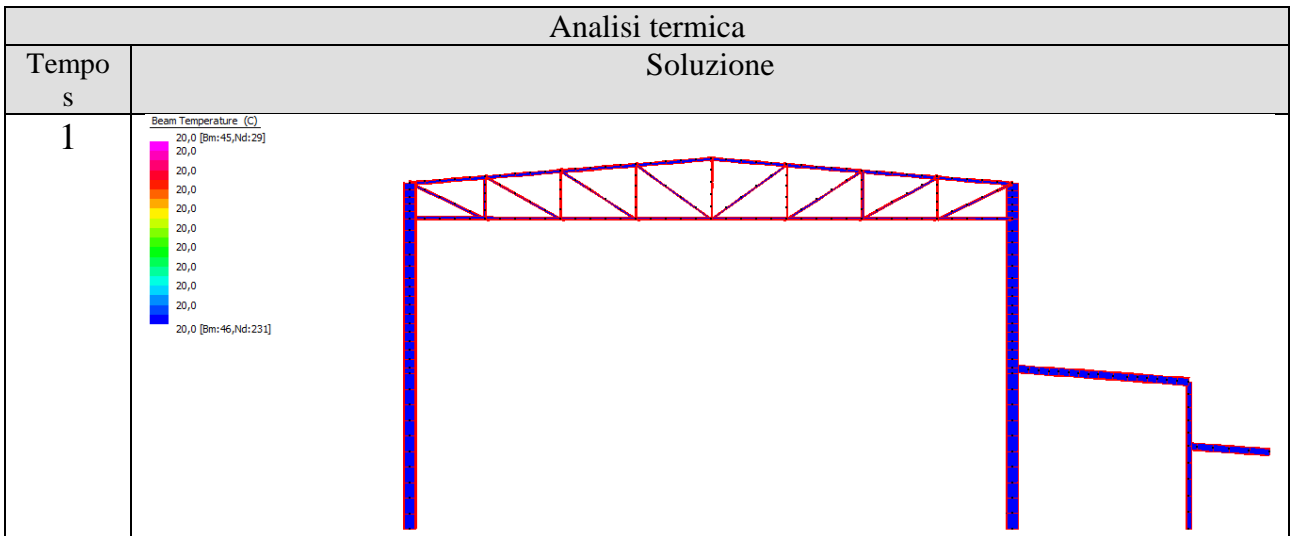
Analisi Meccanica

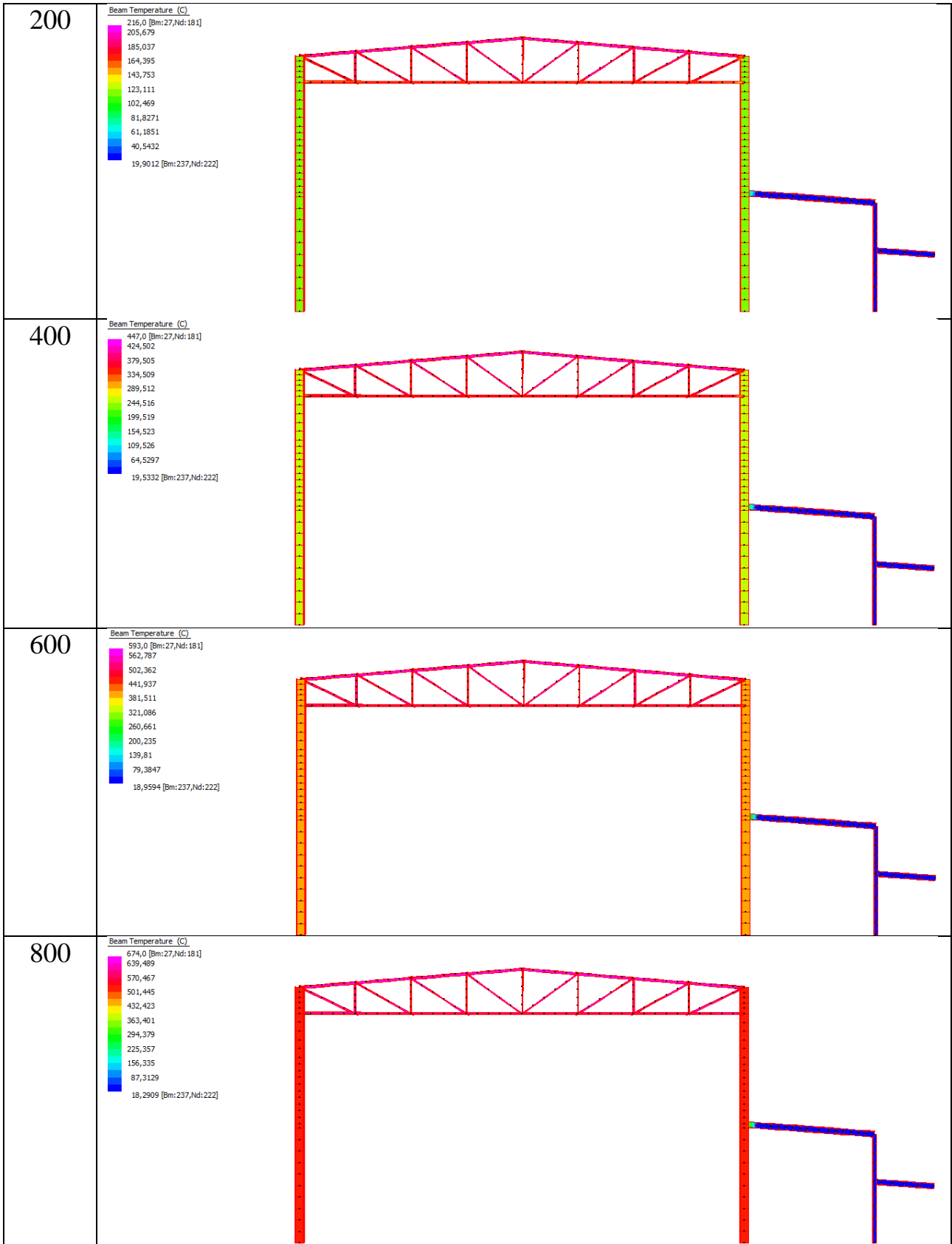
Tempo s	Soluzione
1	
200	
400	
600	

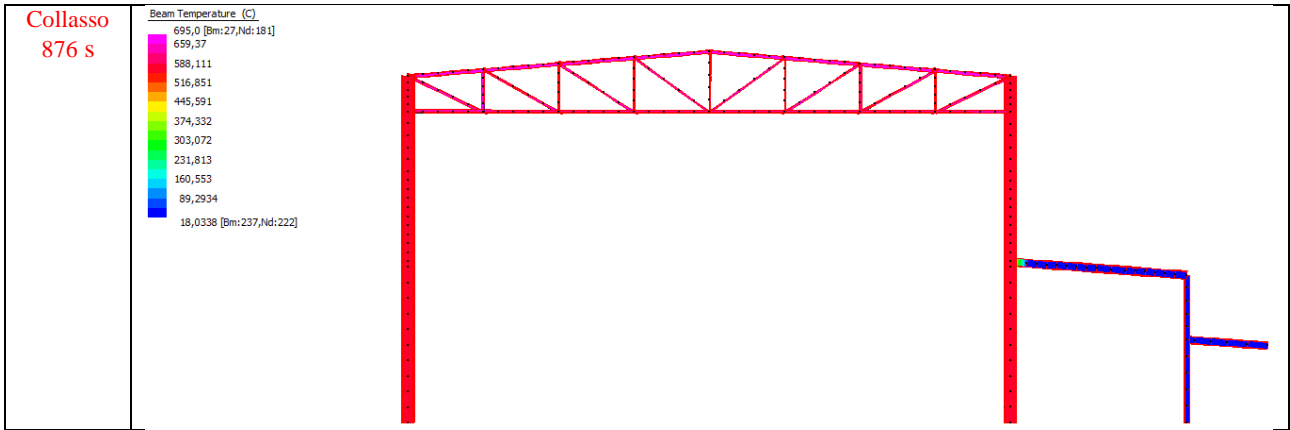




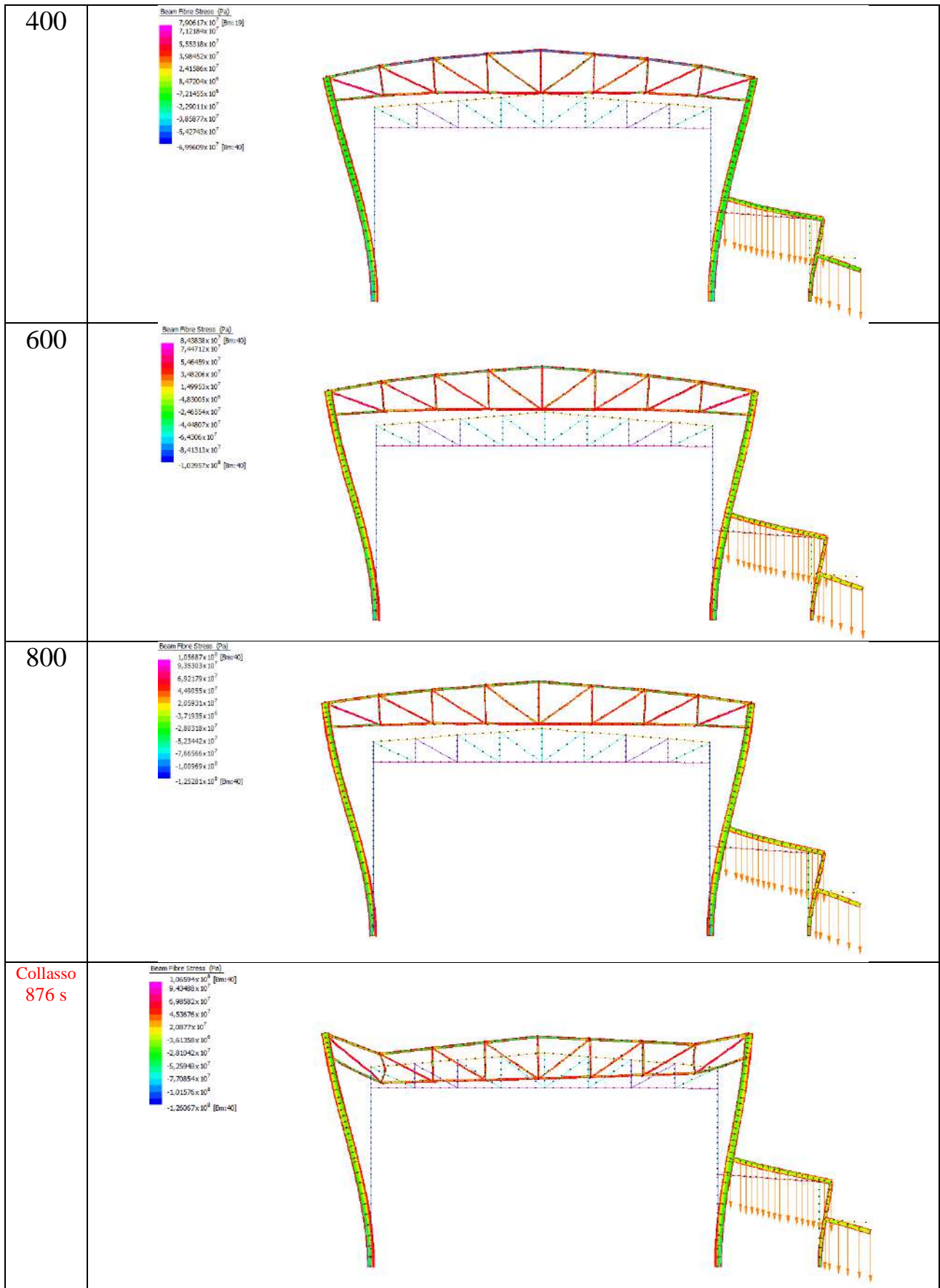
SCENARIO 3 – DIFFUSO SU TUTTO IL MAGAZZINO







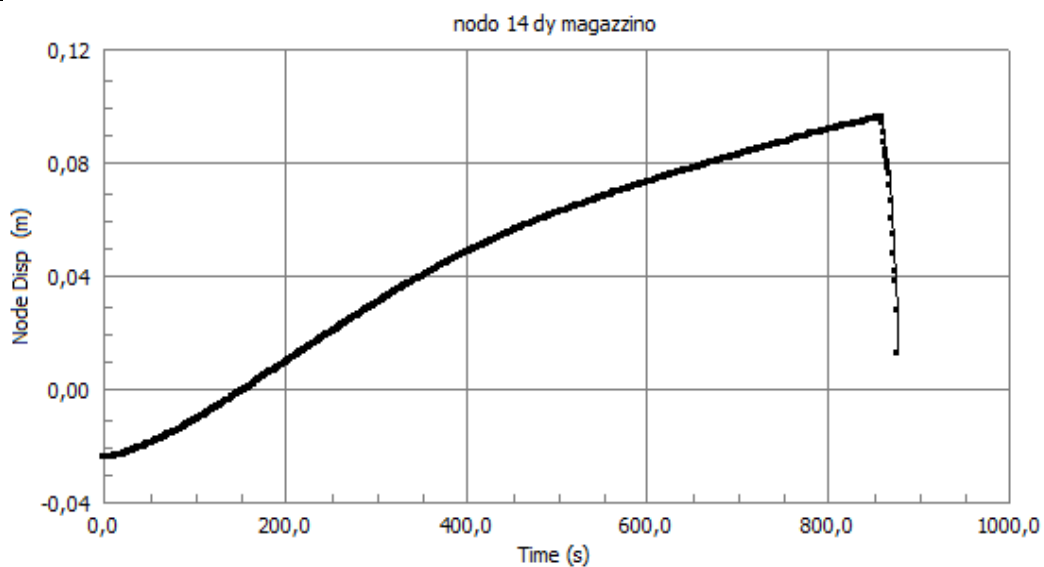
Analisi Meccanica																							
Soluzione																							
Tempo s																							
1	<p>Beam Flex. Stress (Pa)</p> <table border="1"> <tr><td>$8,098072 \times 10^7$</td><td>[Bm:152]</td></tr> <tr><td>$7,38284 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$5,95108 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$4,51933 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$3,08757 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$1,65582 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$2,24063 \times 10^6$</td><td></td></tr> <tr><td>$-1,20269 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$-2,62945 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$-4,0712 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$-5,30295 \times 10^7$</td><td>[Bm:153]</td></tr> </table>	$8,098072 \times 10^7$	[Bm:152]	$7,38284 \times 10^7$		$5,95108 \times 10^7$		$4,51933 \times 10^7$		$3,08757 \times 10^7$		$1,65582 \times 10^7$		$2,24063 \times 10^6$		$-1,20269 \times 10^7$		$-2,62945 \times 10^7$		$-4,0712 \times 10^7$		$-5,30295 \times 10^7$	[Bm:153]
$8,098072 \times 10^7$	[Bm:152]																						
$7,38284 \times 10^7$																							
$5,95108 \times 10^7$																							
$4,51933 \times 10^7$																							
$3,08757 \times 10^7$																							
$1,65582 \times 10^7$																							
$2,24063 \times 10^6$																							
$-1,20269 \times 10^7$																							
$-2,62945 \times 10^7$																							
$-4,0712 \times 10^7$																							
$-5,30295 \times 10^7$	[Bm:153]																						
200	<p>Beam Flex. Stress (Pa)</p> <table border="1"> <tr><td>$7,8842 \times 10^7$</td><td>[Bm:102]</td></tr> <tr><td>$7,16281 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$5,71996 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$4,27711 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$2,83426 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$1,39141 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>-514361</td><td></td></tr> <tr><td>$-1,49429 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$-2,93714 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$-4,37999 \times 10^7$</td><td></td></tr> <tr><td>$-5,82284 \times 10^7$</td><td>[Bm:152]</td></tr> </table>	$7,8842 \times 10^7$	[Bm:102]	$7,16281 \times 10^7$		$5,71996 \times 10^7$		$4,27711 \times 10^7$		$2,83426 \times 10^7$		$1,39141 \times 10^7$		-514361		$-1,49429 \times 10^7$		$-2,93714 \times 10^7$		$-4,37999 \times 10^7$		$-5,82284 \times 10^7$	[Bm:152]
$7,8842 \times 10^7$	[Bm:102]																						
$7,16281 \times 10^7$																							
$5,71996 \times 10^7$																							
$4,27711 \times 10^7$																							
$2,83426 \times 10^7$																							
$1,39141 \times 10^7$																							
-514361																							
$-1,49429 \times 10^7$																							
$-2,93714 \times 10^7$																							
$-4,37999 \times 10^7$																							
$-5,82284 \times 10^7$	[Bm:152]																						



Punti di controllo scenario 3

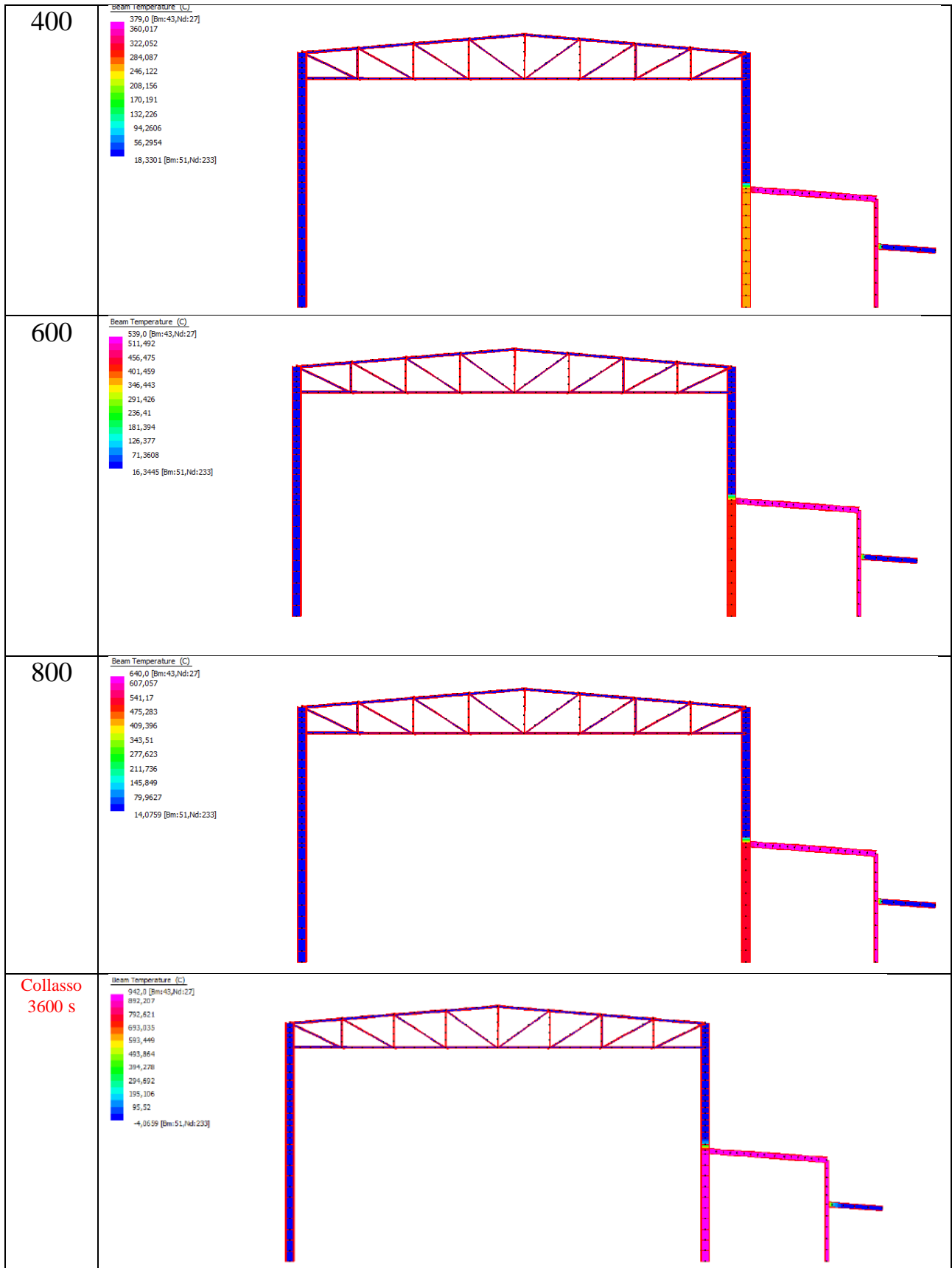
Nodo	Grafico
1	<p style="text-align: center;">nodo 1 dx magazzino</p> <p>The graph for Node 1 shows a relationship between Time (s) on the y-axis and Node Disp (m) on the x-axis. The y-axis ranges from 0,0 to 1000,0 with major ticks every 200,0. The x-axis ranges from -0,16 to 0,04 with major ticks every 0,04. The curve begins at approximately (-0,14, 880), stays constant until -0,12, then curves downwards, passing through approximately (-0,08, 500) and (-0,04, 250), finally reaching (0,00, 0).</p>
5	<p style="text-align: center;">nodo 5 dx magazzino</p> <p>The graph for Node 5 shows a relationship between Time (s) on the y-axis and Node Disp (m) on the x-axis. The y-axis ranges from 0,0 to 1000,0 with major ticks every 200,0. The x-axis ranges from -0,050 to -0,000 with major ticks every 0,010. The curve begins at approximately (-0,05, 880), stays constant until -0,045, then curves downwards, passing through approximately (-0,04, 700) and (-0,02, 400), finally reaching (-0,005, 0).</p>

14



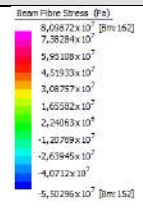
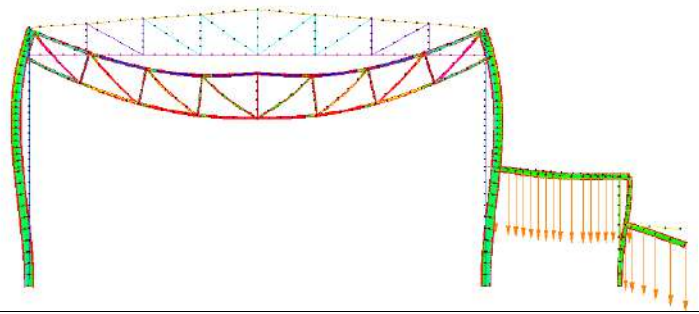
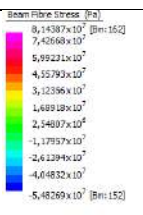
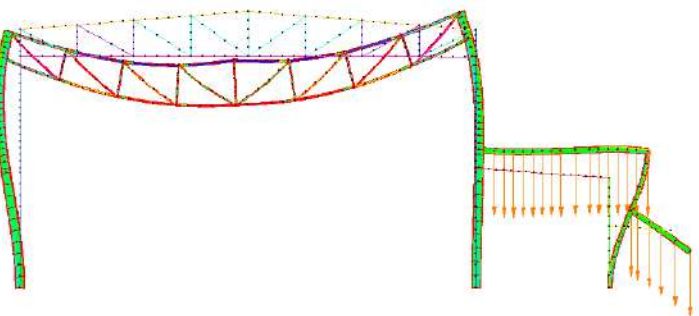
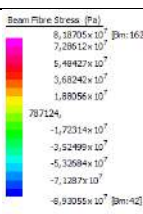
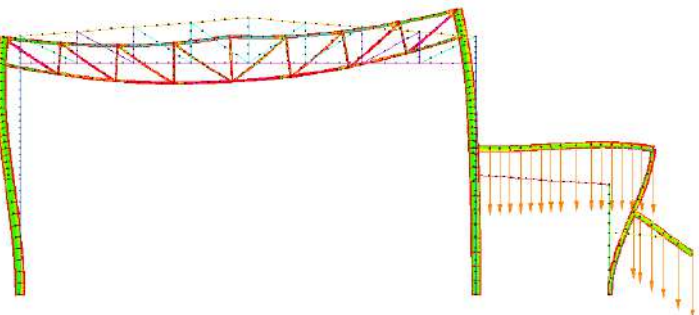
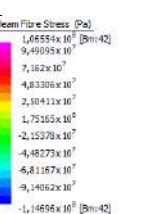
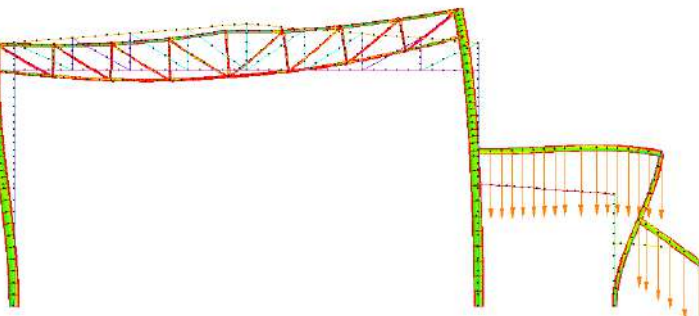
SCENARIO 4 – LOCALE COLLETTAME

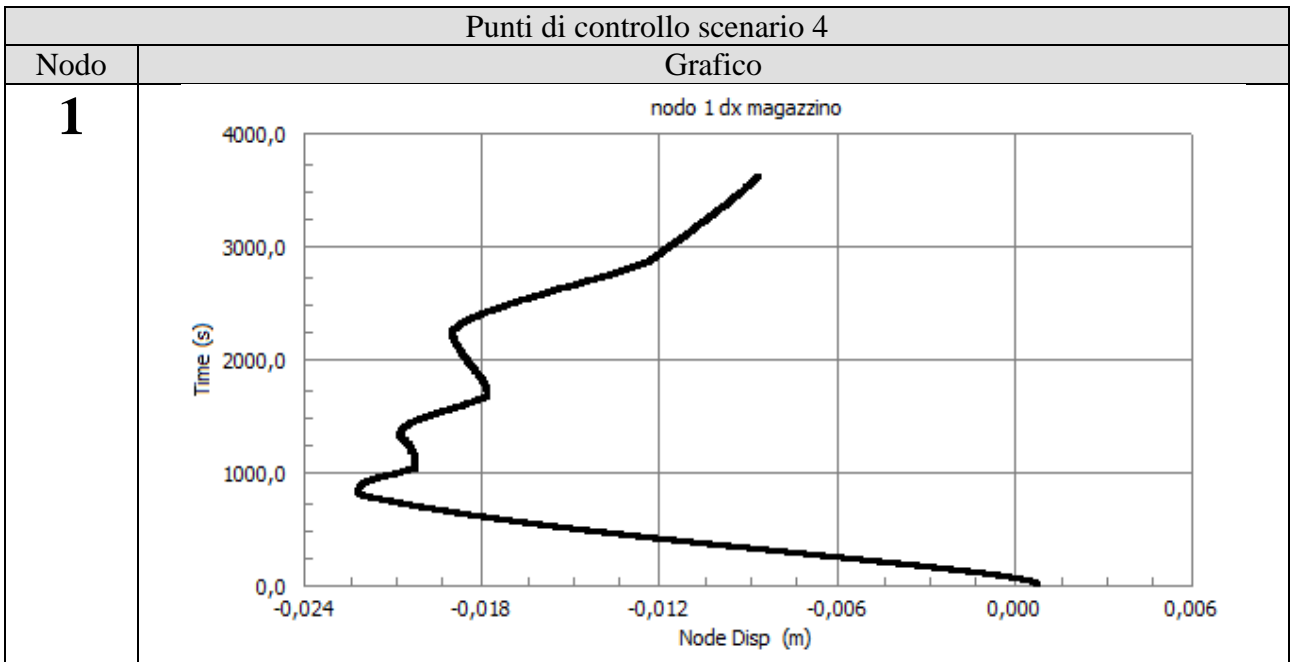
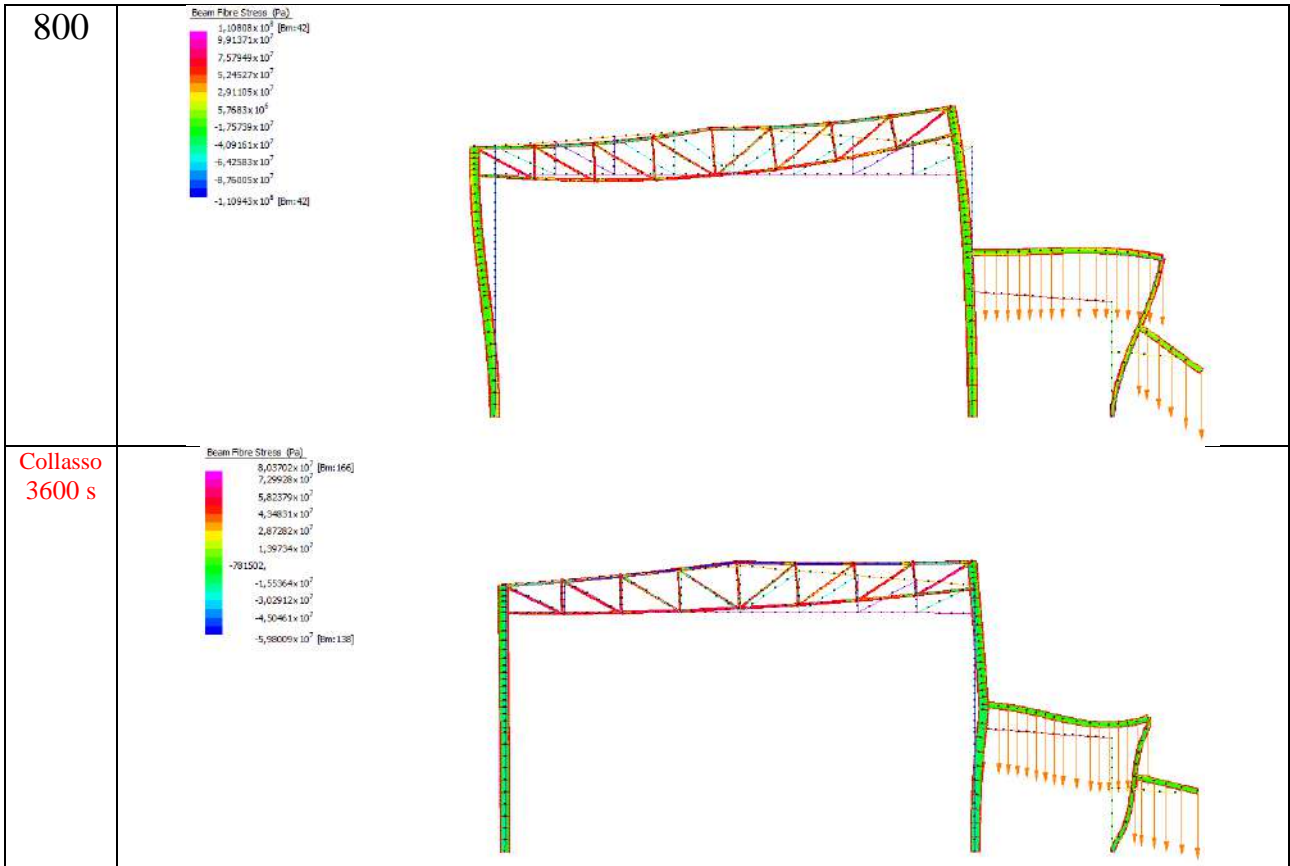
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C) 20,0 [Bm:36,Nd:2] 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 [Bm:3,Nd:85]</p>
200	<p>Beam Temperature (C) 173,0 [Bm:43,Nd:27] 164,928 148,785 132,642 116,499 100,355 84,2119 68,0686 51,9254 35,7821 19,6388 [Bm:51,Nd:233]</p>

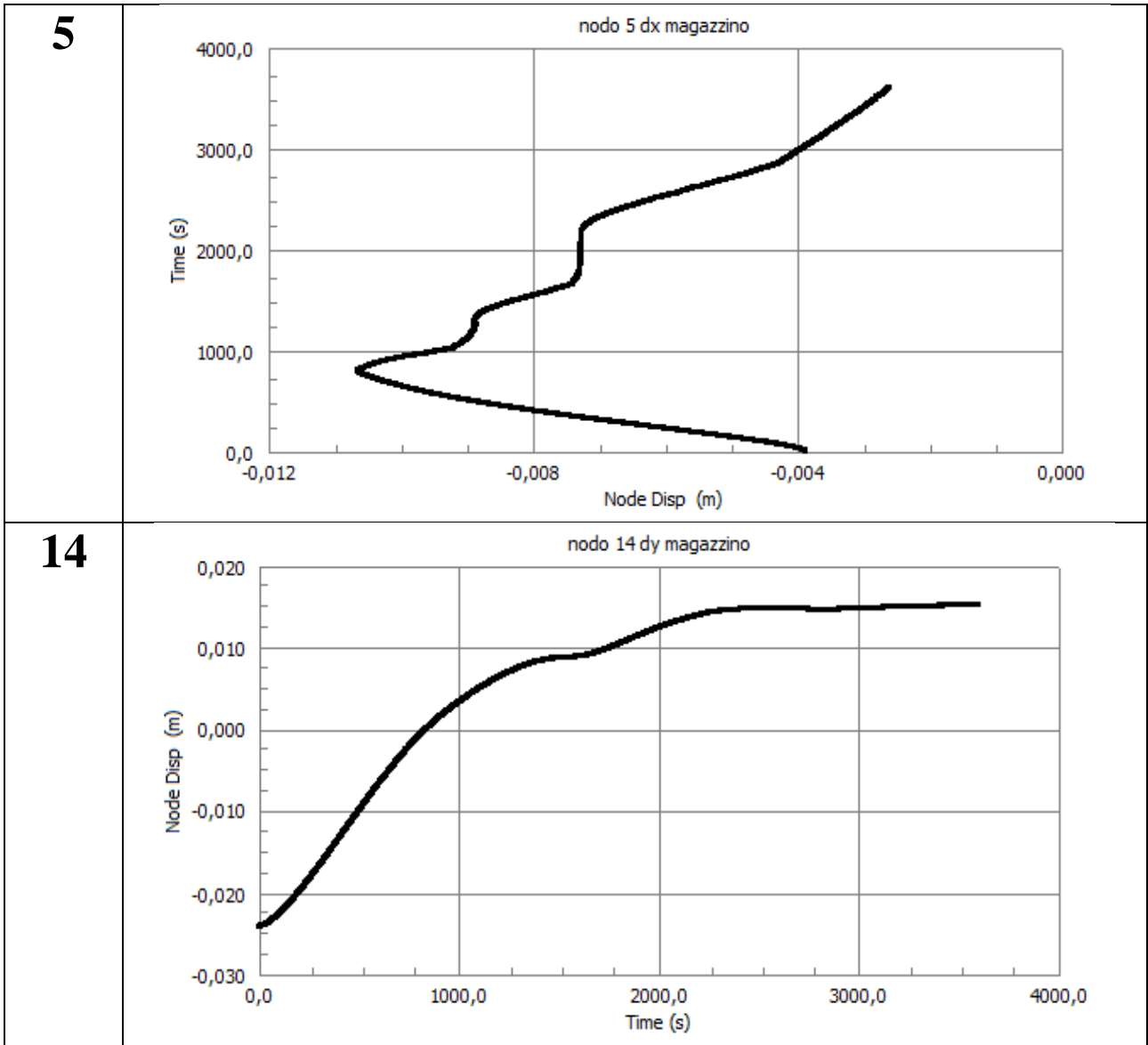


Analisi Meccanica

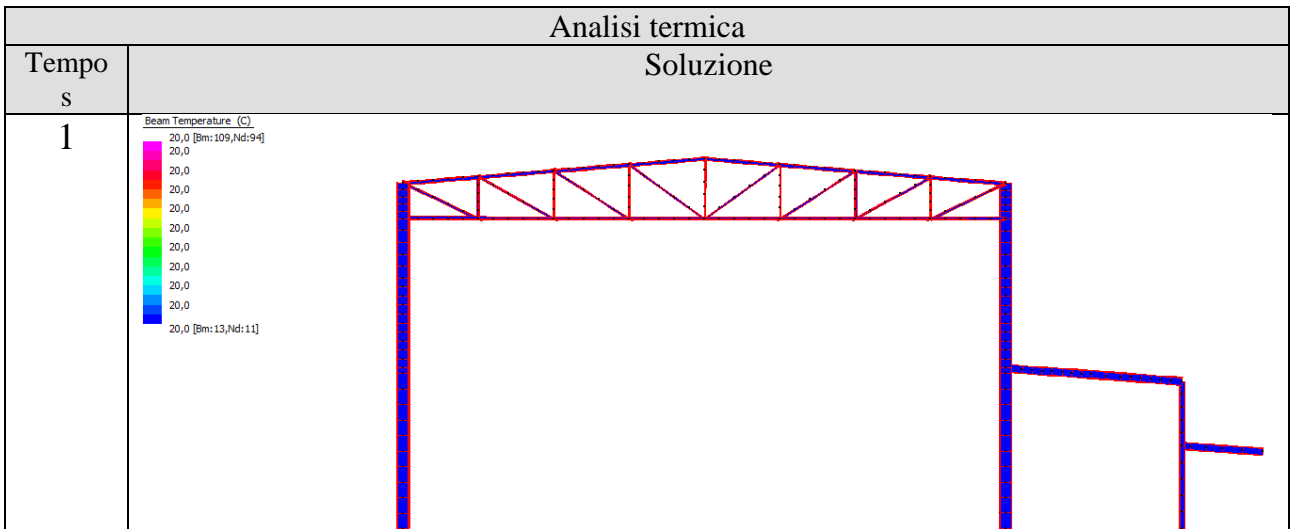
Soluzione

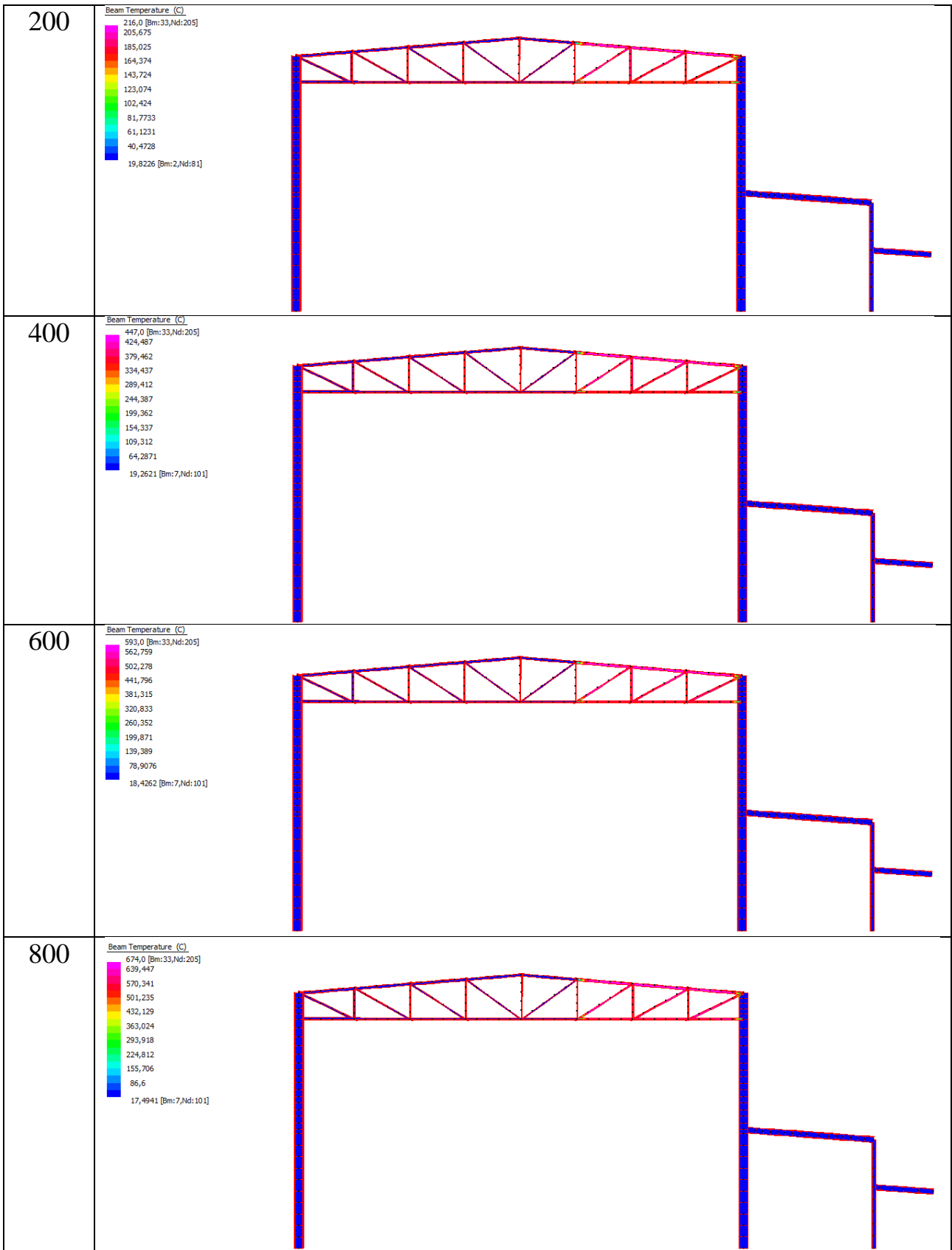
Tempo s	
1	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8,03872x10⁷ [Bm:162] 7,38284x10⁷ 5,99108x10⁷ 4,51933x10⁷ 3,08787x10⁷ 1,65582x10⁷ 2,24063x10⁶ -1,20789x10⁷ -2,63845x10⁷ -4,0712x10⁷ -5,50296x10⁷ [Bm:152] 
200	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8,14387x10⁷ [Bm:162] 7,43668x10⁷ 5,99221x10⁷ 4,55793x10⁷ 3,12396x10⁷ 1,68918x10⁷ 2,54807x10⁶ -1,17937x10⁷ -2,61294x10⁷ -4,04832x10⁷ 5,48269x10⁷ [Bm:152] 
400	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8,15705x10⁷ [Bm:162] 7,28612x10⁷ 5,4942x10⁷ 3,68242x10⁷ 1,88056x10⁷ 287124, -1,72314x10⁷ -3,52499x10⁷ -5,32684x10⁷ -7,1287x10⁷ -8,92085x10⁷ [Bm:42] 
600	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1,66554x10⁸ [Bm:42] 9,49095x10⁷ 7,162x10⁷ 4,83306x10⁷ 2,50411x10⁷ 1,75165x10⁶ -2,15378x10⁷ -4,48273x10⁷ -6,81167x10⁷ -9,14062x10⁷ -1,14696x10⁸ [Bm:42] 

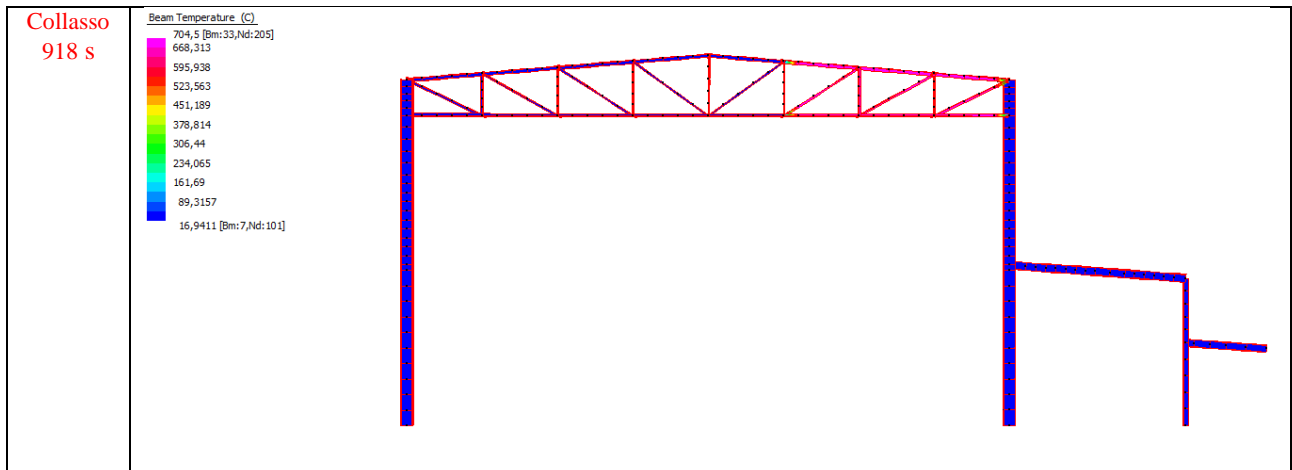




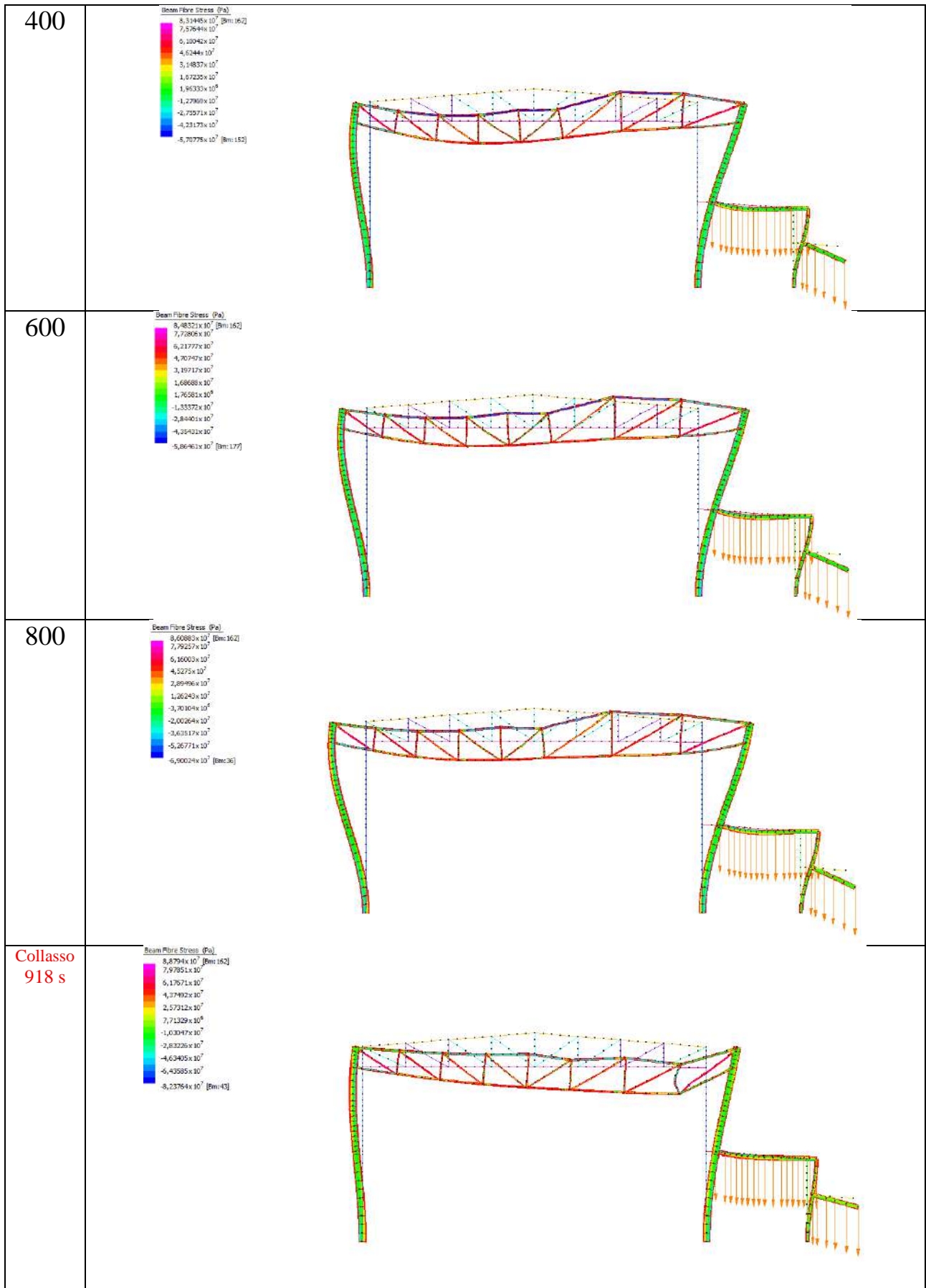
SCENARIO 5 – CAPRIATA MAGAZZINO LATO DESTRO







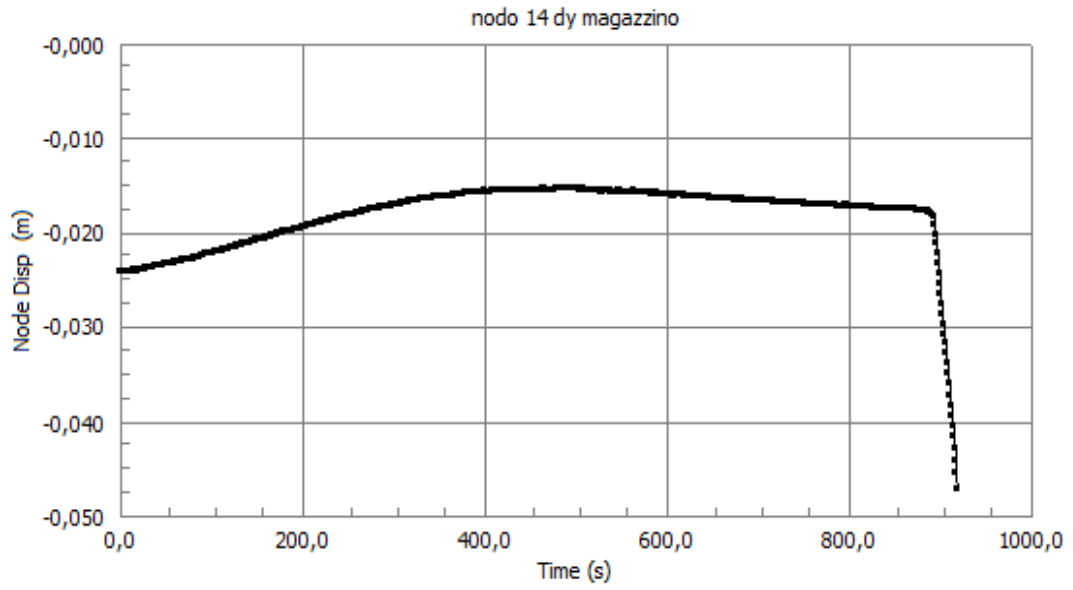
Analisi Meccanica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> $8,99872 \times 10^7$ [Bm:162] $7,38239 \times 10^7$ $5,95108 \times 10^7$ $4,51933 \times 10^7$ $3,08757 \times 10^7$ $1,65582 \times 10^7$ $2,24063 \times 10^6$ $-1,20749 \times 10^7$ $-2,63945 \times 10^7$ $-4,0712 \times 10^7$ $-5,50296 \times 10^7$ [Bm:152]
200	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> $8,1725 \times 10^7$ [Bm:162] $7,44328 \times 10^7$ $5,98425 \times 10^7$ $4,52541 \times 10^7$ $3,06627 \times 10^7$ $1,60773 \times 10^7$ $1,48889 \times 10^6$ $-1,20992 \times 10^7$ $-2,76879 \times 10^7$ $-4,22763 \times 10^7$ $-5,68647 \times 10^7$ [Bm:152]



Punti di controllo scenario 5

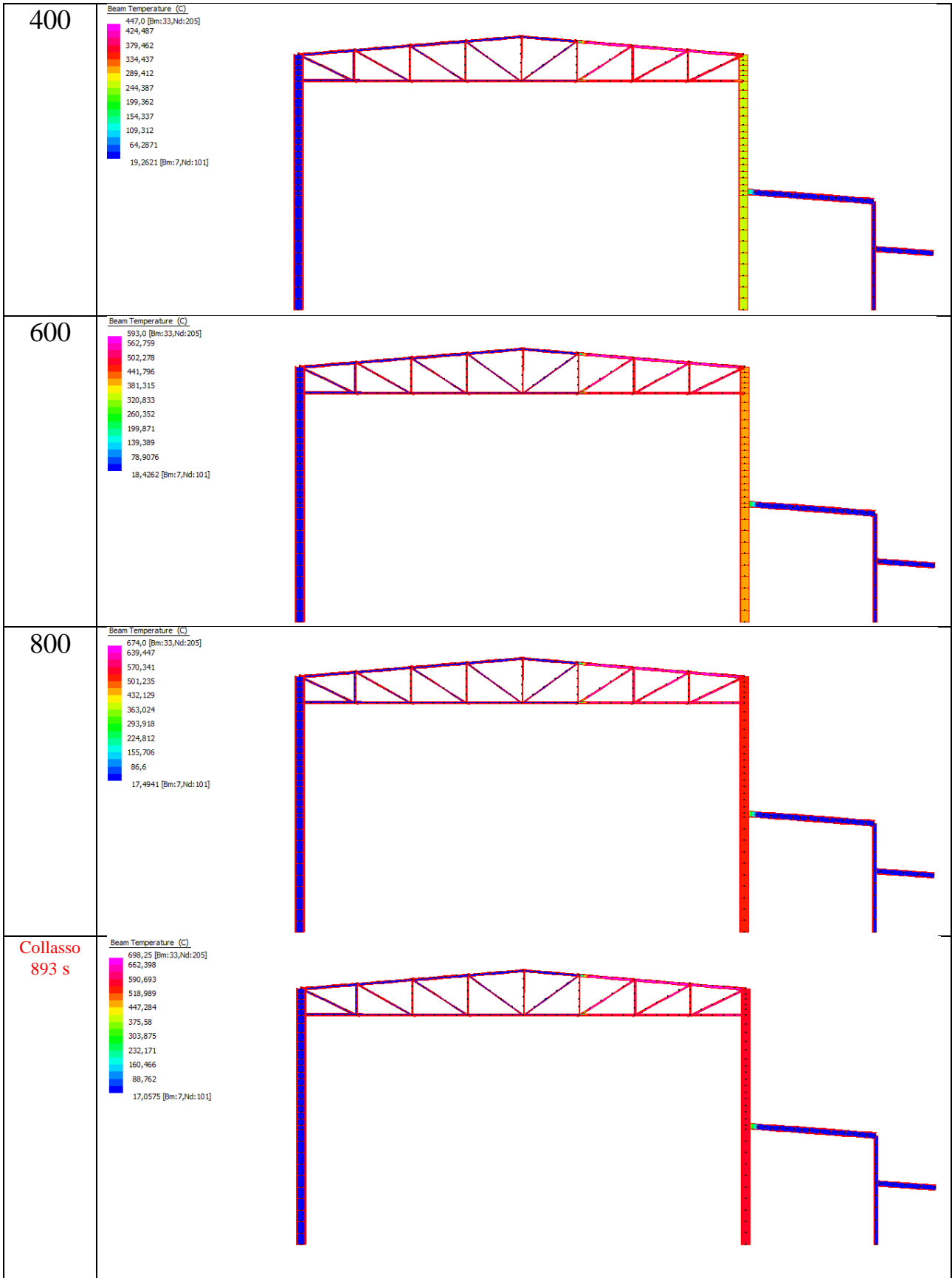
Nodo	Grafico
1	<p style="text-align: center;">nodo 1 dx magazzino</p> <p>The graph for Node 1 shows the relationship between Node Displacement (m) on the x-axis and Time (s) on the y-axis. The x-axis ranges from -0.040 to 0.010 with major ticks every 0.010. The y-axis ranges from 0.0 to 1000.0 with major ticks every 200.0. The curve starts at approximately (-0.033, 900), remains nearly horizontal until about -0.015, then curves downwards to reach (0.000, 0). A dashed horizontal line is drawn at approximately Time = 900.</p>
5	<p style="text-align: center;">nodo 5 dx magazzino</p> <p>The graph for Node 5 shows the relationship between Node Displacement (m) on the x-axis and Time (s) on the y-axis. The x-axis ranges from -0.020 to 0.000 with major ticks every 0.004. The y-axis ranges from 0.0 to 1000.0 with major ticks every 200.0. The curve starts at approximately (-0.017, 900), remains nearly horizontal until about -0.013, then curves downwards to reach (-0.004, 0). A dashed horizontal line is drawn at approximately Time = 900.</p>

14



SCENARIO 6 – CAPRIATA MAGAZZINO LATO DESTRO E PILASTRO DESTRO

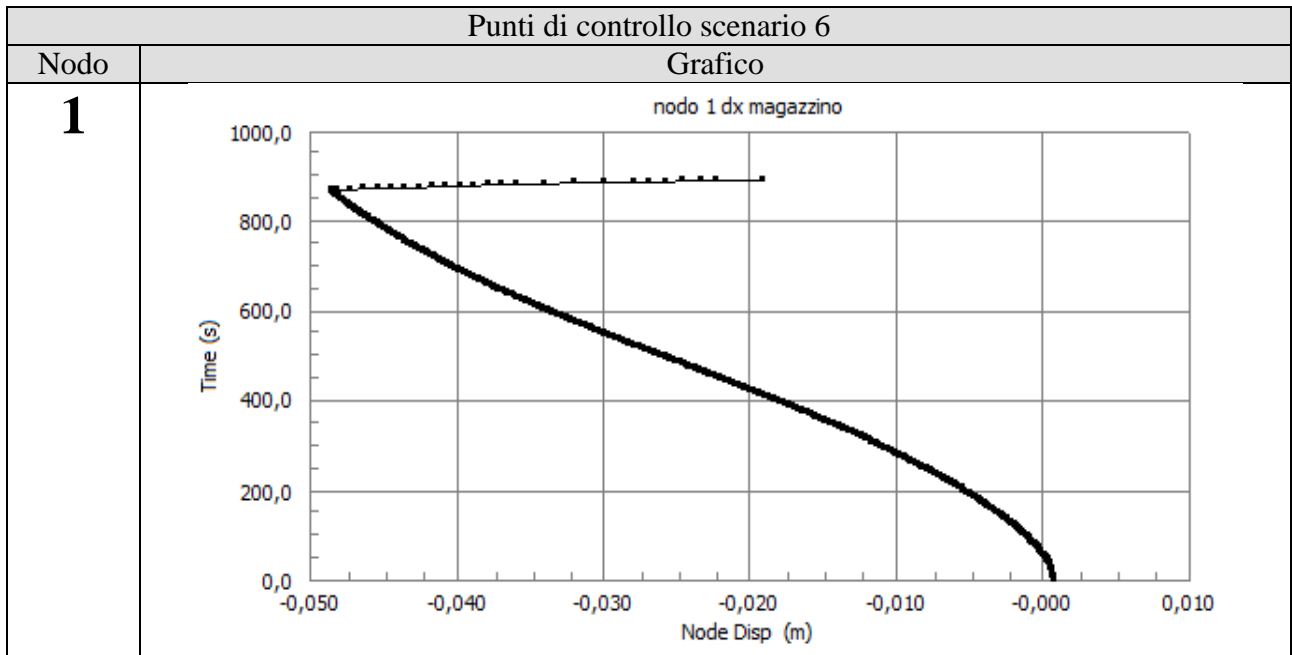
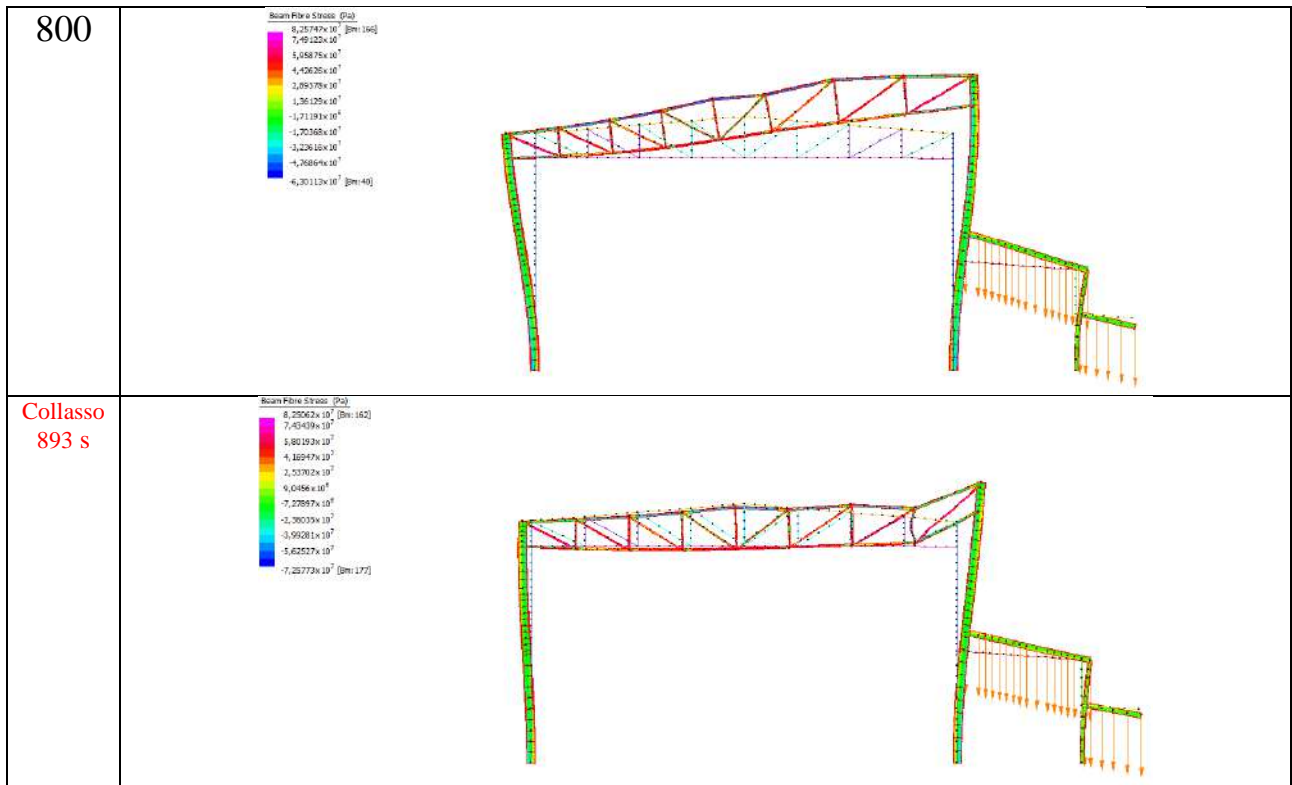
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C) 20,0 [Bm:109,Nd:94] 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 [Bm:13,Nd:11]</p>
200	<p>Beam Temperature (C) 216,0 [Bm:33,Nd:205] 205,676 185,027 164,378 143,729 123,08 102,431 81,7819 61,1329 40,484 19,8351 [Bm:7,Nd:101]</p>

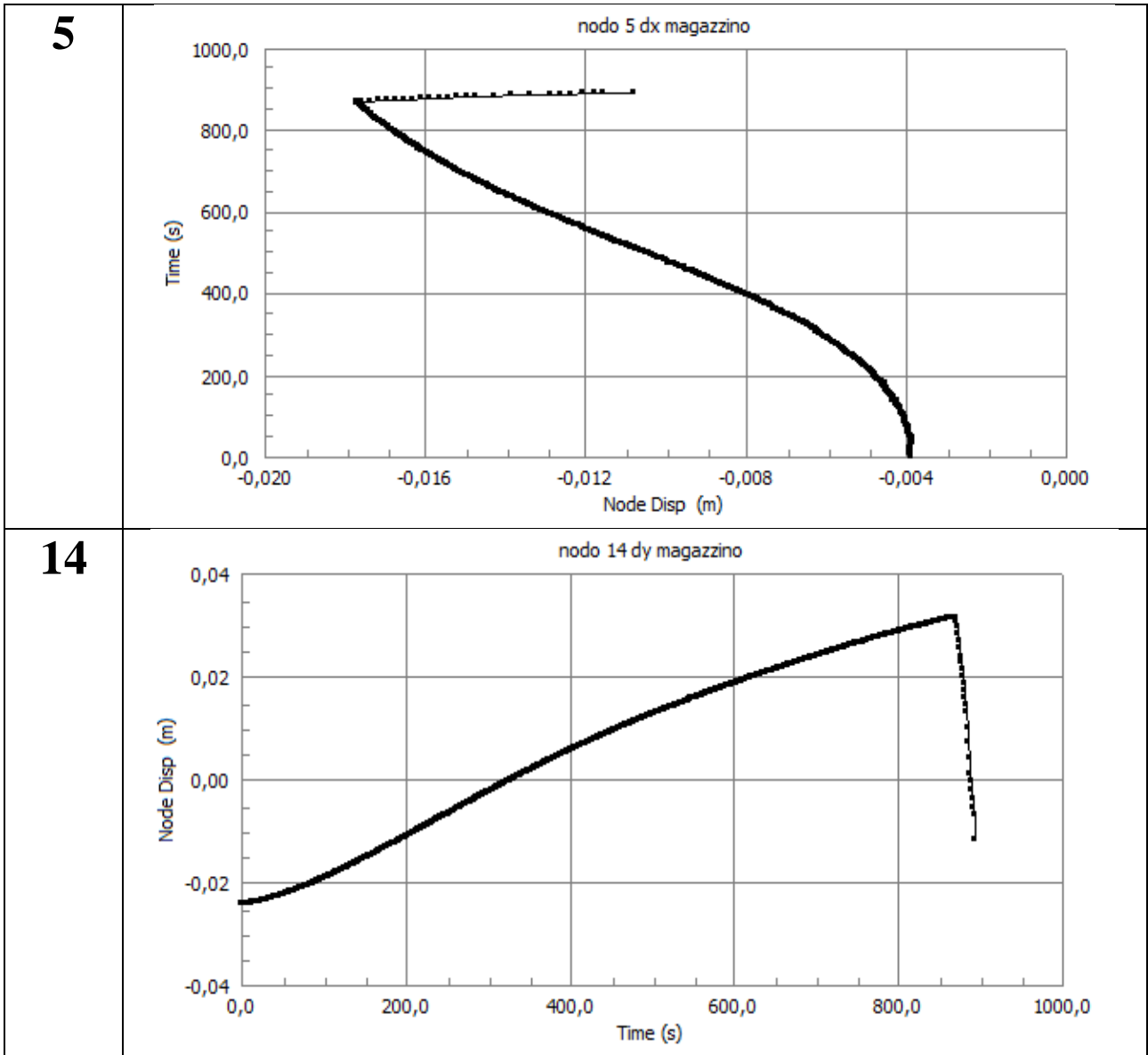


Analisi Meccanica

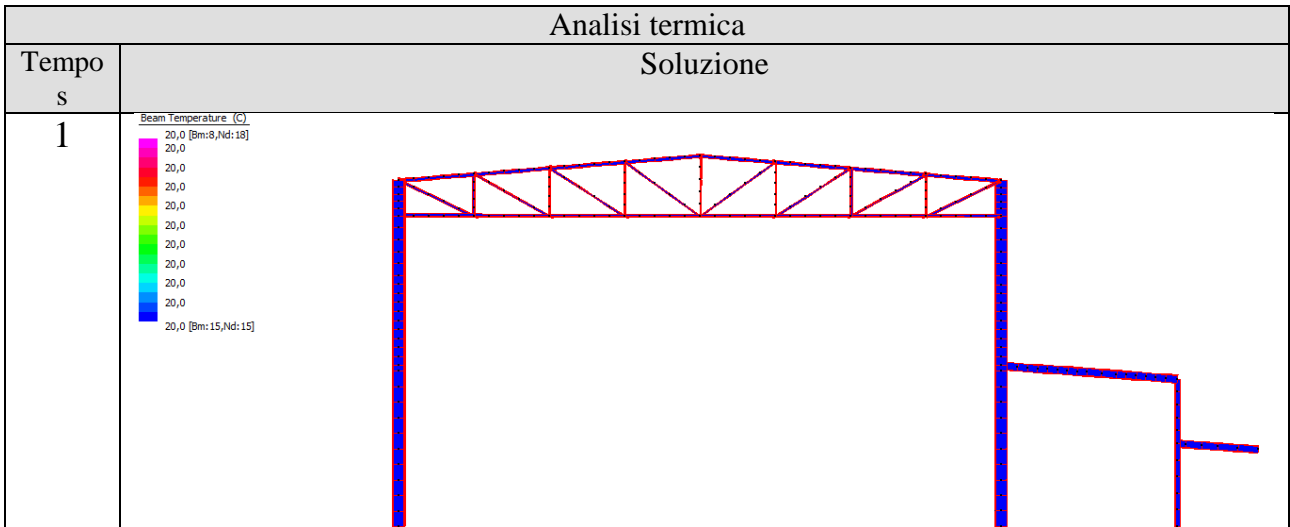
Soluzione

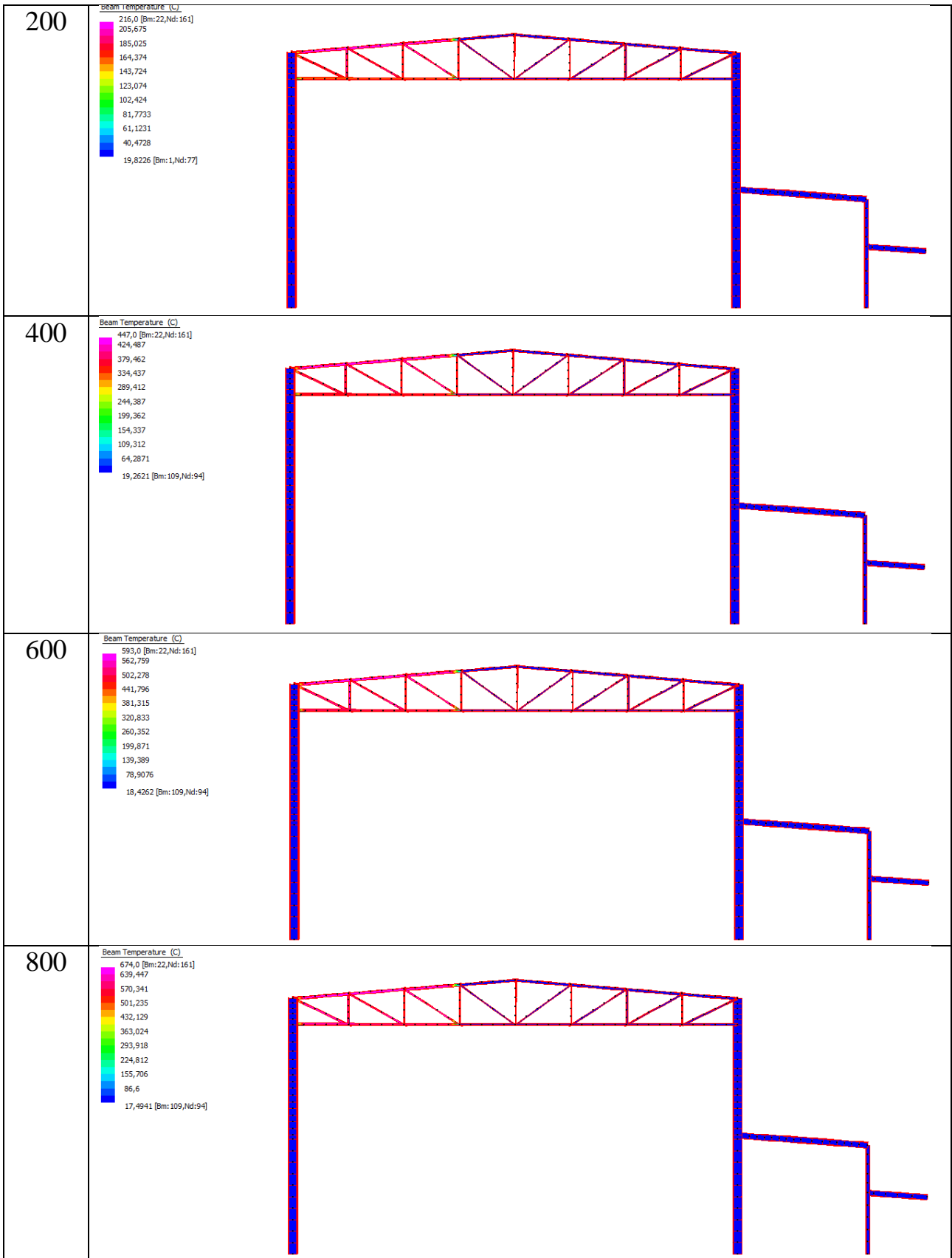
Tempo s	
1	
200	
400	
600	

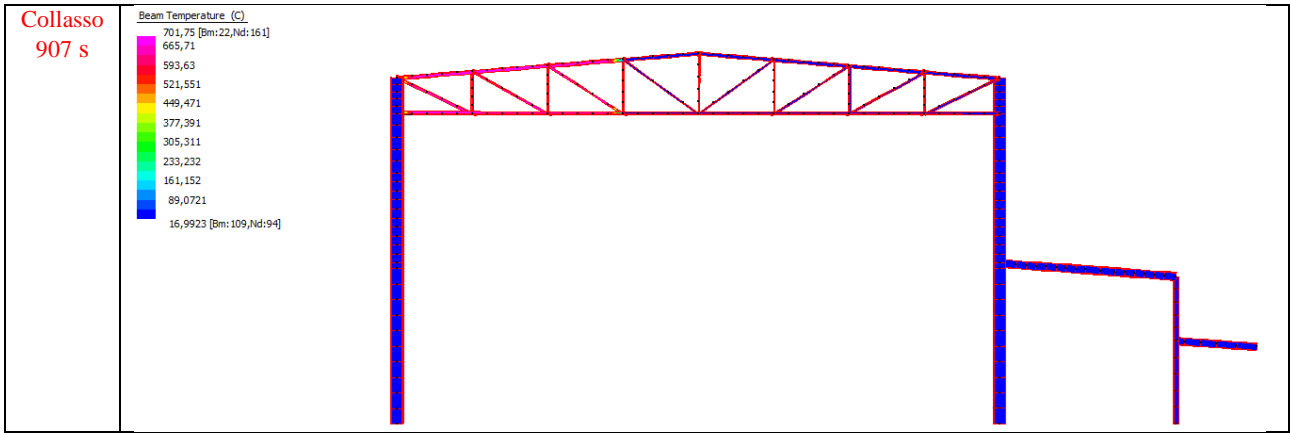




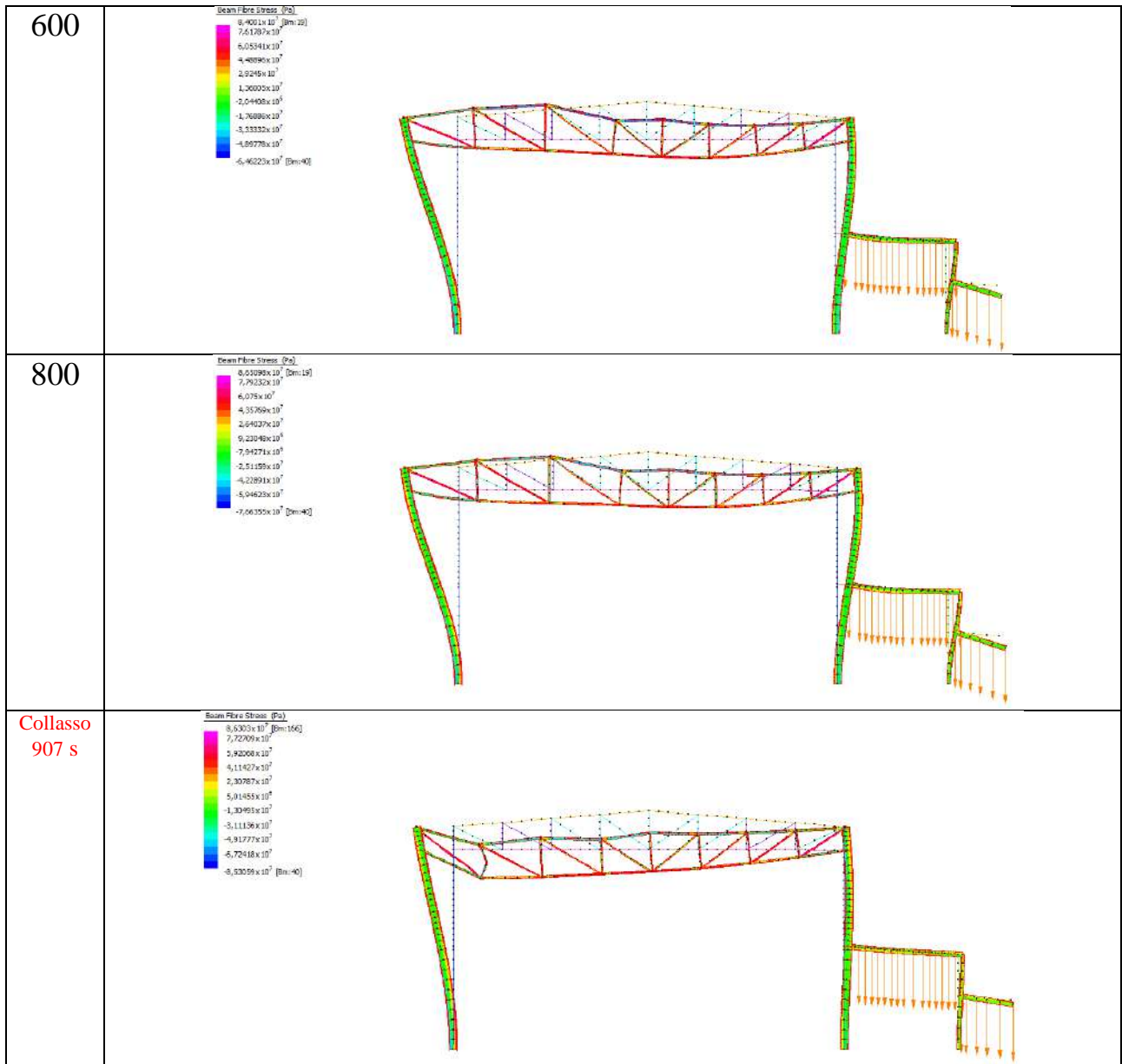
SCENARIO 7 – CAPRIATA MAGAZZINO LATO SINISTRO



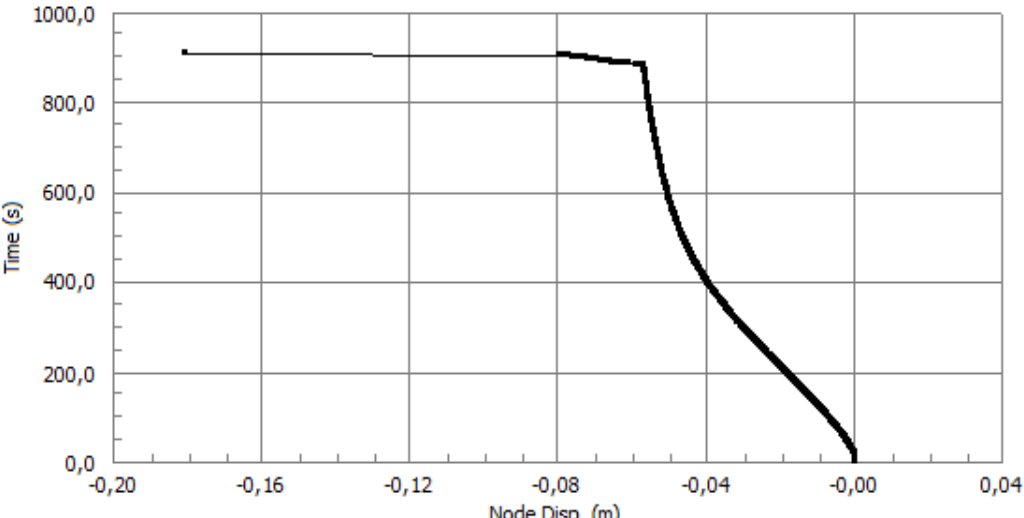
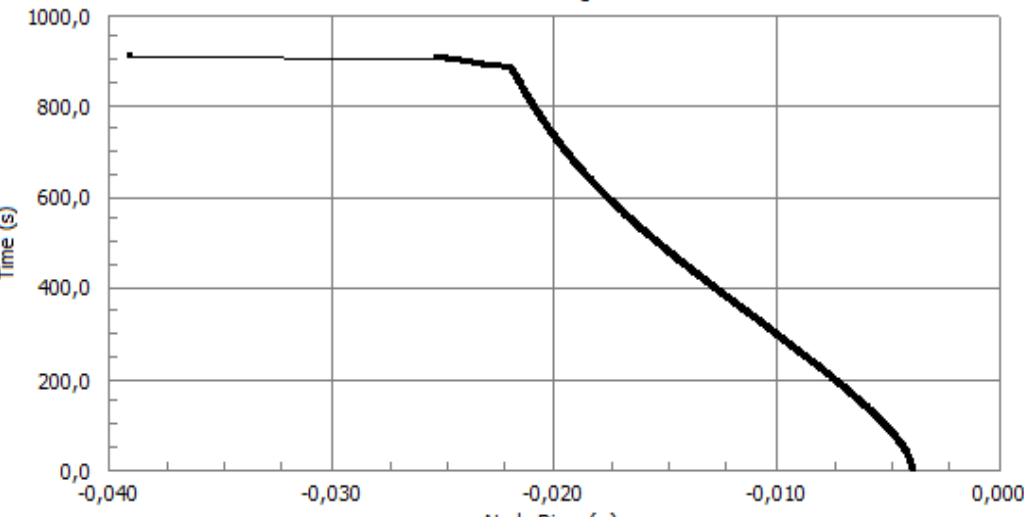
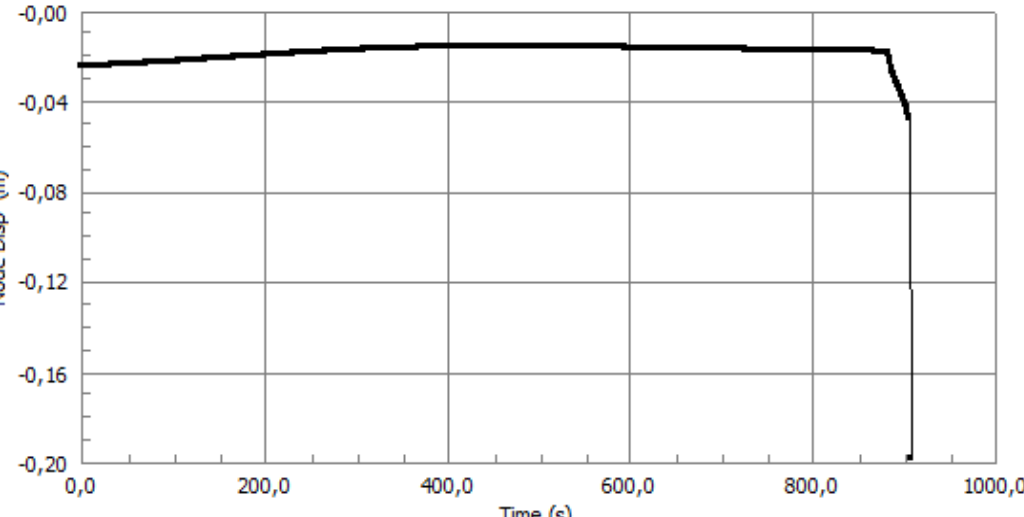




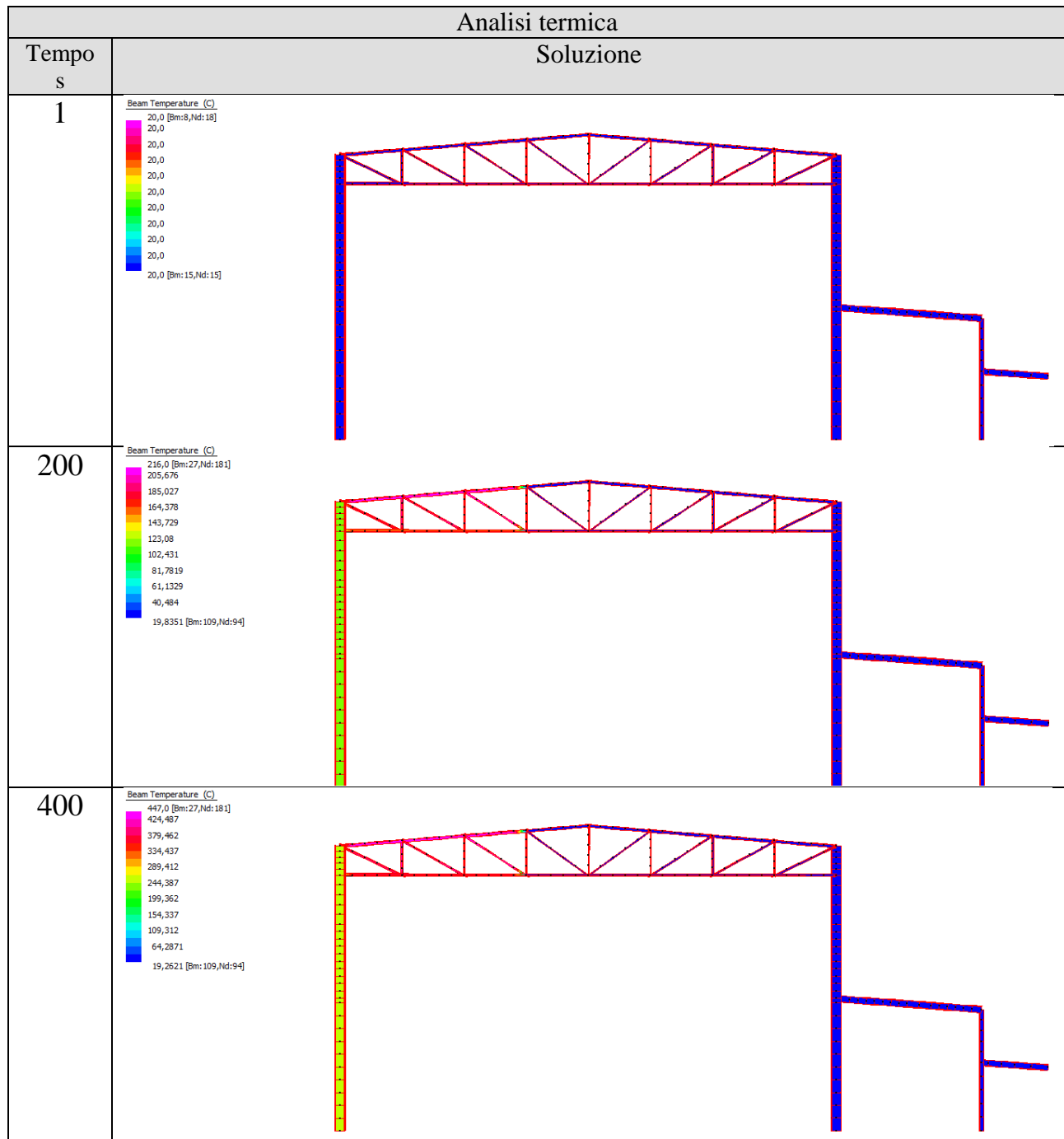
Analisi Meccanica												
Soluzione												
Tempo s												
1	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <table border="1"> <tr><td>$8,09472 \times 10^7$ [Bm:102]</td></tr> <tr><td>$7,38284 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$5,95108 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$4,51933 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$3,08757 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$1,65582 \times 10^8$</td></tr> <tr><td>$2,24962 \times 10^8$</td></tr> <tr><td>$-1,20768 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-2,63948 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-4,0712 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-5,50296 \times 10^7$ [Bm:132]</td></tr> </table>	$8,09472 \times 10^7$ [Bm:102]	$7,38284 \times 10^7$	$5,95108 \times 10^7$	$4,51933 \times 10^7$	$3,08757 \times 10^7$	$1,65582 \times 10^8$	$2,24962 \times 10^8$	$-1,20768 \times 10^7$	$-2,63948 \times 10^7$	$-4,0712 \times 10^7$	$-5,50296 \times 10^7$ [Bm:132]
$8,09472 \times 10^7$ [Bm:102]												
$7,38284 \times 10^7$												
$5,95108 \times 10^7$												
$4,51933 \times 10^7$												
$3,08757 \times 10^7$												
$1,65582 \times 10^8$												
$2,24962 \times 10^8$												
$-1,20768 \times 10^7$												
$-2,63948 \times 10^7$												
$-4,0712 \times 10^7$												
$-5,50296 \times 10^7$ [Bm:132]												
200	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <table border="1"> <tr><td>$8,12442 \times 10^7$ [Bm:106]</td></tr> <tr><td>$7,29748 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$5,04389 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$4,48071 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$3,03583 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$1,58104 \times 10^8$</td></tr> <tr><td>$1,2806 \times 10^8$</td></tr> <tr><td>$-1,33382 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-2,77971 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-4,23399 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-5,68747 \times 10^7$ [Bm:138]</td></tr> </table>	$8,12442 \times 10^7$ [Bm:106]	$7,29748 \times 10^7$	$5,04389 \times 10^7$	$4,48071 \times 10^7$	$3,03583 \times 10^7$	$1,58104 \times 10^8$	$1,2806 \times 10^8$	$-1,33382 \times 10^7$	$-2,77971 \times 10^7$	$-4,23399 \times 10^7$	$-5,68747 \times 10^7$ [Bm:138]
$8,12442 \times 10^7$ [Bm:106]												
$7,29748 \times 10^7$												
$5,04389 \times 10^7$												
$4,48071 \times 10^7$												
$3,03583 \times 10^7$												
$1,58104 \times 10^8$												
$1,2806 \times 10^8$												
$-1,33382 \times 10^7$												
$-2,77971 \times 10^7$												
$-4,23399 \times 10^7$												
$-5,68747 \times 10^7$ [Bm:138]												
400	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <table border="1"> <tr><td>$8,13786 \times 10^7$ [Bm:206]</td></tr> <tr><td>$7,46619 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$6,0028 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$4,53941 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$3,07692 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$1,61264 \times 10^8$</td></tr> <tr><td>$1,49255 \times 10^8$</td></tr> <tr><td>$-1,31413 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-2,77752 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-4,24091 \times 10^7$</td></tr> <tr><td>$-5,70429 \times 10^7$ [Bm:138]</td></tr> </table>	$8,13786 \times 10^7$ [Bm:206]	$7,46619 \times 10^7$	$6,0028 \times 10^7$	$4,53941 \times 10^7$	$3,07692 \times 10^7$	$1,61264 \times 10^8$	$1,49255 \times 10^8$	$-1,31413 \times 10^7$	$-2,77752 \times 10^7$	$-4,24091 \times 10^7$	$-5,70429 \times 10^7$ [Bm:138]
$8,13786 \times 10^7$ [Bm:206]												
$7,46619 \times 10^7$												
$6,0028 \times 10^7$												
$4,53941 \times 10^7$												
$3,07692 \times 10^7$												
$1,61264 \times 10^8$												
$1,49255 \times 10^8$												
$-1,31413 \times 10^7$												
$-2,77752 \times 10^7$												
$-4,24091 \times 10^7$												
$-5,70429 \times 10^7$ [Bm:138]												

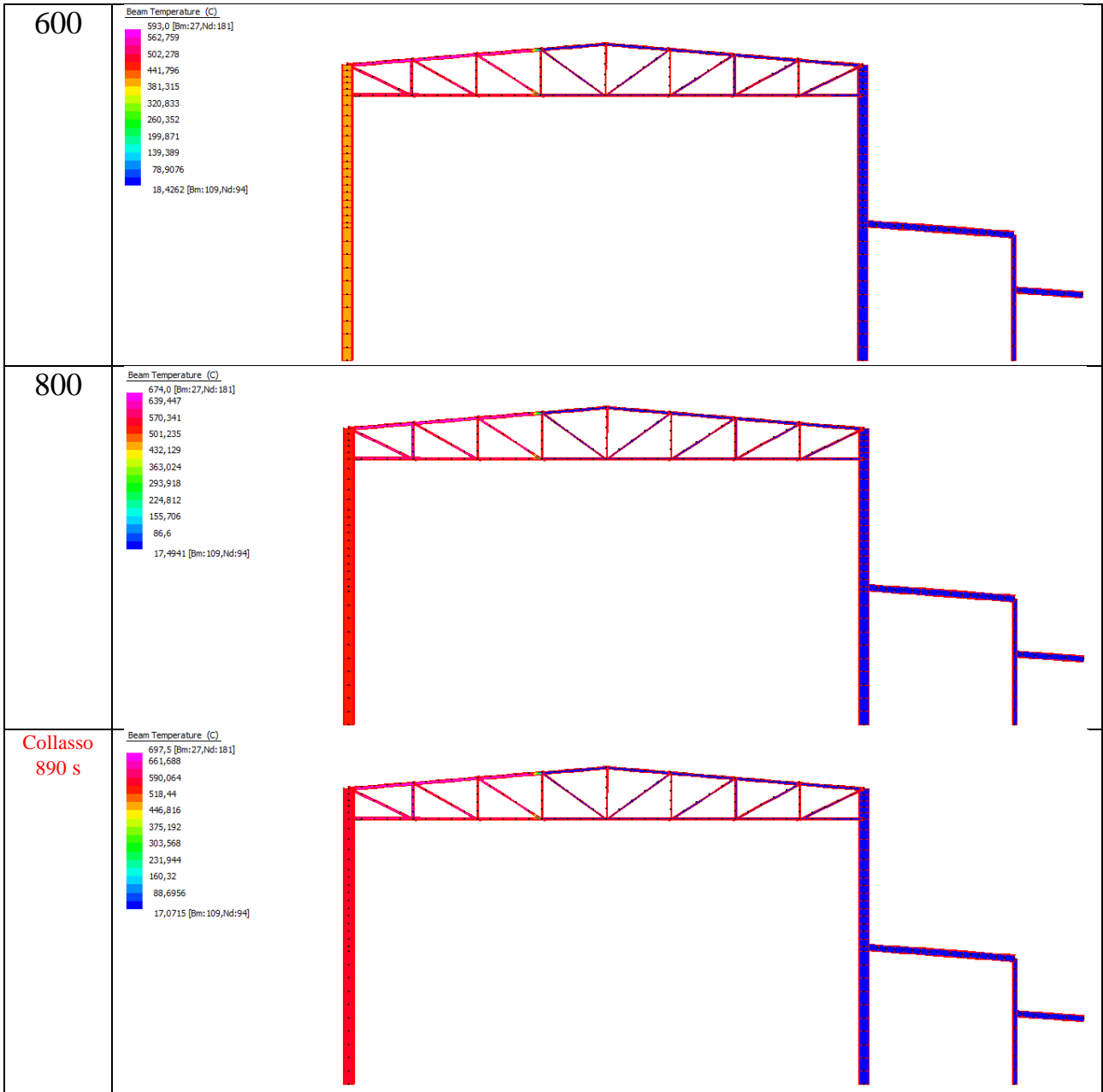


Punti di controllo scenario 7

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p>nodo 1 dx magazzino</p> 
<p>5</p>	<p>nodo 5 dx magazzino</p> 
<p>14</p>	<p>nodo 14 dy magazzino</p> 

SCENARIO 8 – CAPRIATA MAGAZZINO LATO SINISTRO E PILASTRO SINISTRO

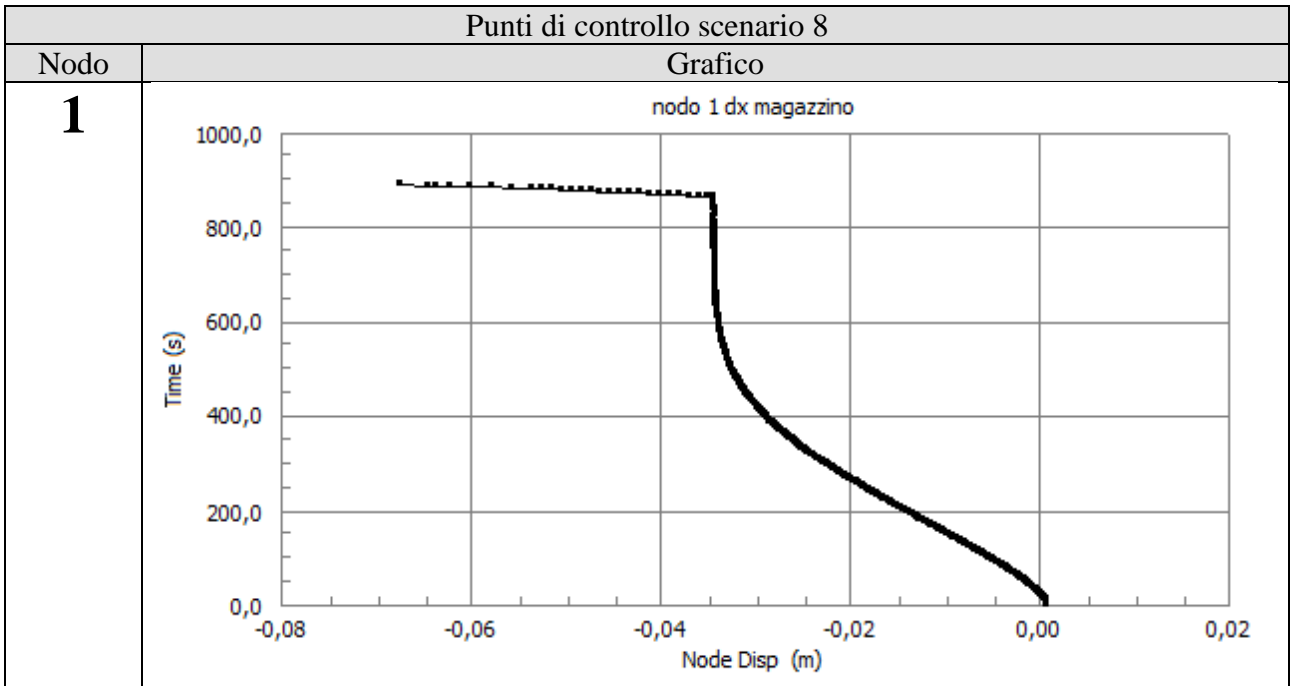
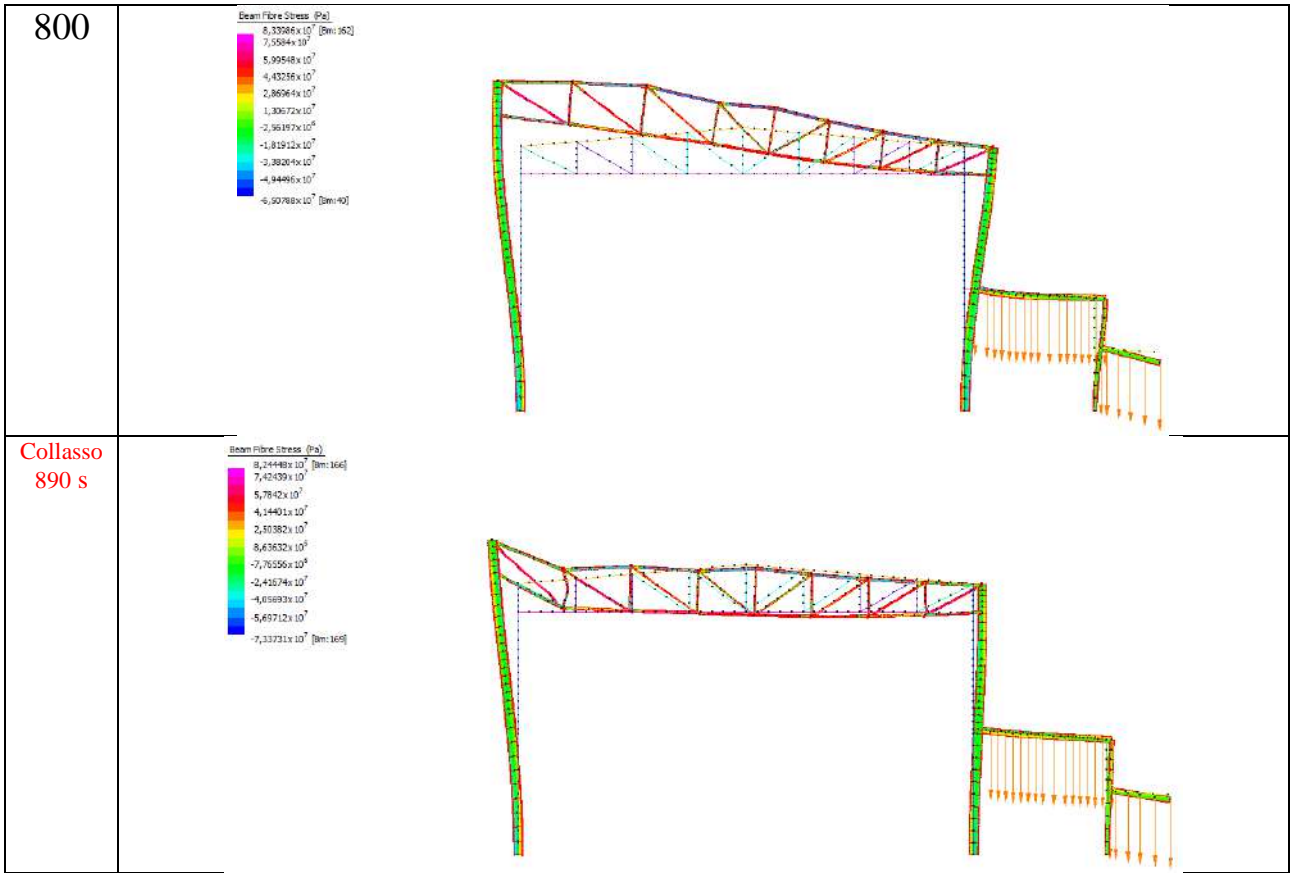


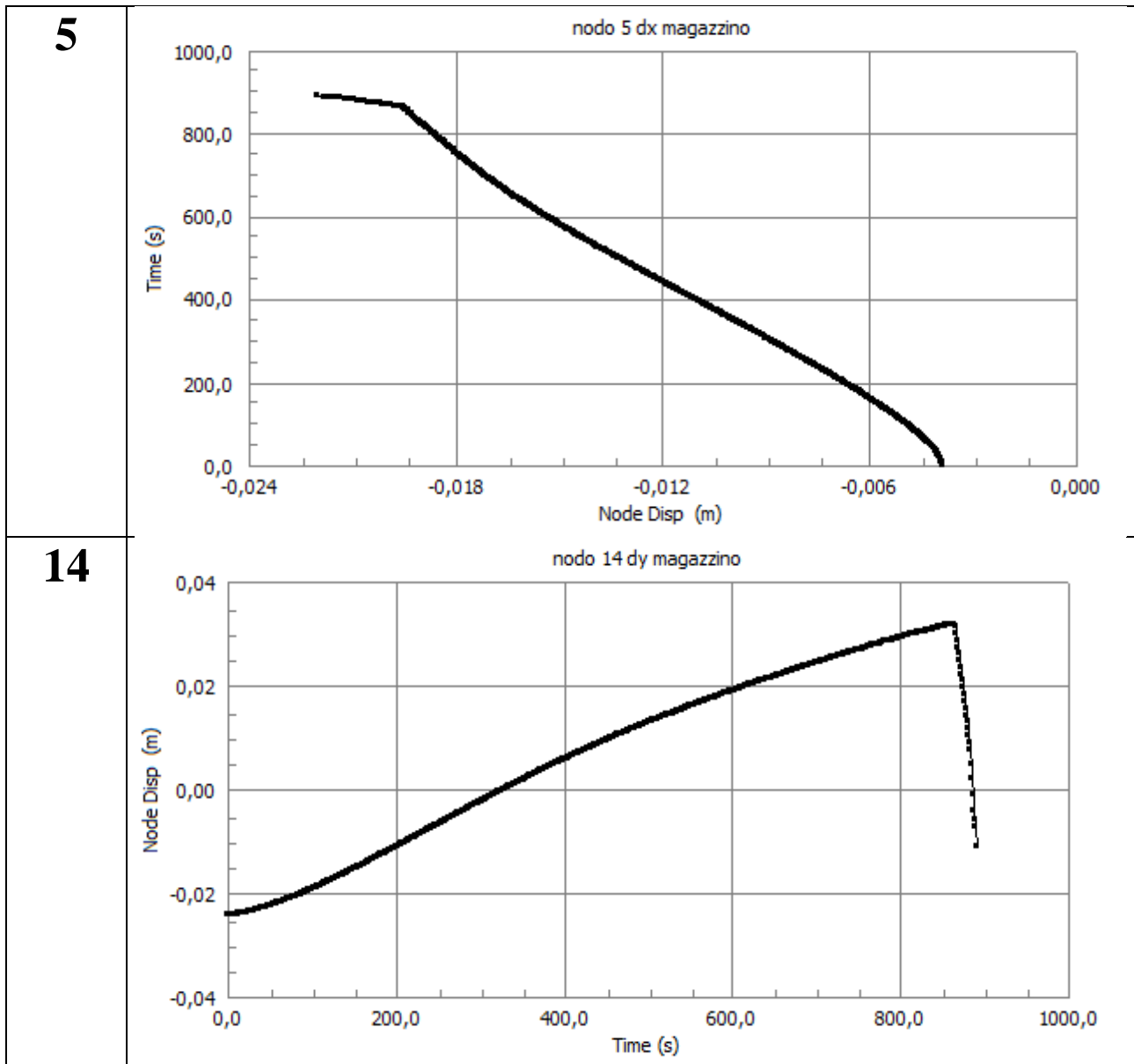


Analisi Meccanica

Soluzione

Tempo s	
1	
200	
400	
600	





5 TELAIIO SEMPLICE IMPERFETTO

Si analizza la medesima sottostruttura, introducendo delle imperfezioni per studiarne il collasso e quanto queste influiscano sulla soluzione.

Nell'Eurocodice 3 capitolo 5.2.4, si studia l'introduzione delle imperfezioni nel modello.

“Margini adeguati devono essere introdotti per tener conto degli effetti delle imperfezioni reali, incluse le sollecitazioni residue e le imperfezioni geometriche quali la mancanza di verticalità, la mancanza di rettilineità, la mancanza di accoppiamento e le inevitabili eccentricità minori presenti nei collegamenti reali.”

Possono essere usate adeguate imperfezioni geometriche equivalenti, i cui valori rispecchino i possibili effetti di tutti i tipi di imperfezioni.

Gli effetti delle imperfezioni devono essere considerati nei seguenti casi:

- a) analisi globale;*
- b) analisi dei sistemi di controvento;*
- c) calcolo delle membrature.”*

Per quanto riguarda i telai:

Gli effetti delle imperfezioni devono essere considerati nella analisi del telaio attraverso una imperfezione geometrica equivalente sotto forma di una imperfezione laterale iniziale φ determinata dalla relazione:

$$\Phi = k_c k_s \Phi_0$$

Con:

- $\Phi_0 = 1/200$;
- $k_c = (0.5 + 1/n_c)^{0.5}$ con $k_c < 1$;
- $k_s = (0.2 + 1/n_s)^{0.5}$ con $k_s < 1$.

Dove:

- n_c è il numero delle colonne per piano;
- n_s è il numero di piani.

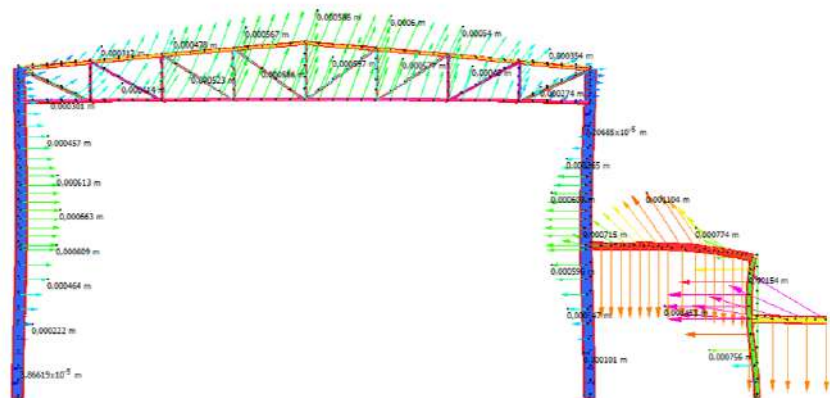
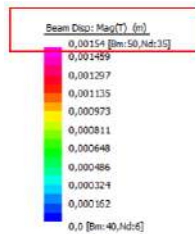
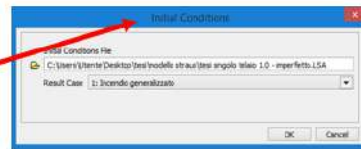
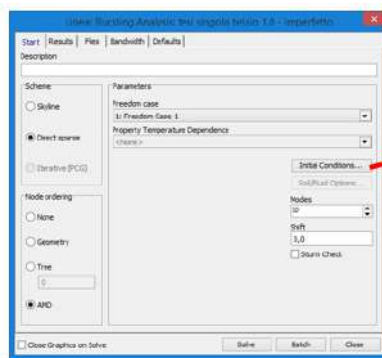
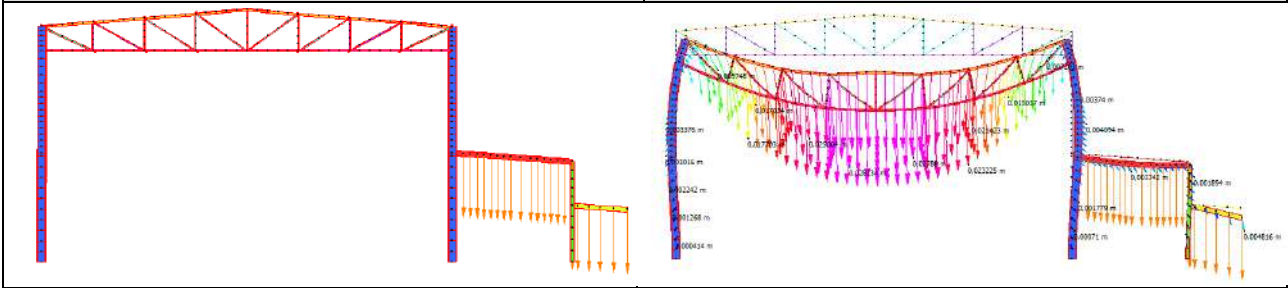
$$\Phi_{max} = k_c k_s \Phi_0 = 0.9 * 1.1 * 0.005 = 0.00495 \cong 0.005m$$

Per tenere conto di questa imperfezione, si possono applicare forze equivalenti oppure imperfezioni geometriche. In questo caso, essendo un telaio semplice, si preferisce applicare delle imperfezioni geometriche. A tale proposito, si esegue un'analisi lineare statica del telaio perfetto, per poi inizializzare un'analisi di buckling ed utilizzare la deformata derivante dai modi di buckling come struttura imperfetta una volta che il moltiplicatore è stato opportunamente scalato per rientrare nei limiti imposti dalla norma.

ANALISI STATICA LINEARE

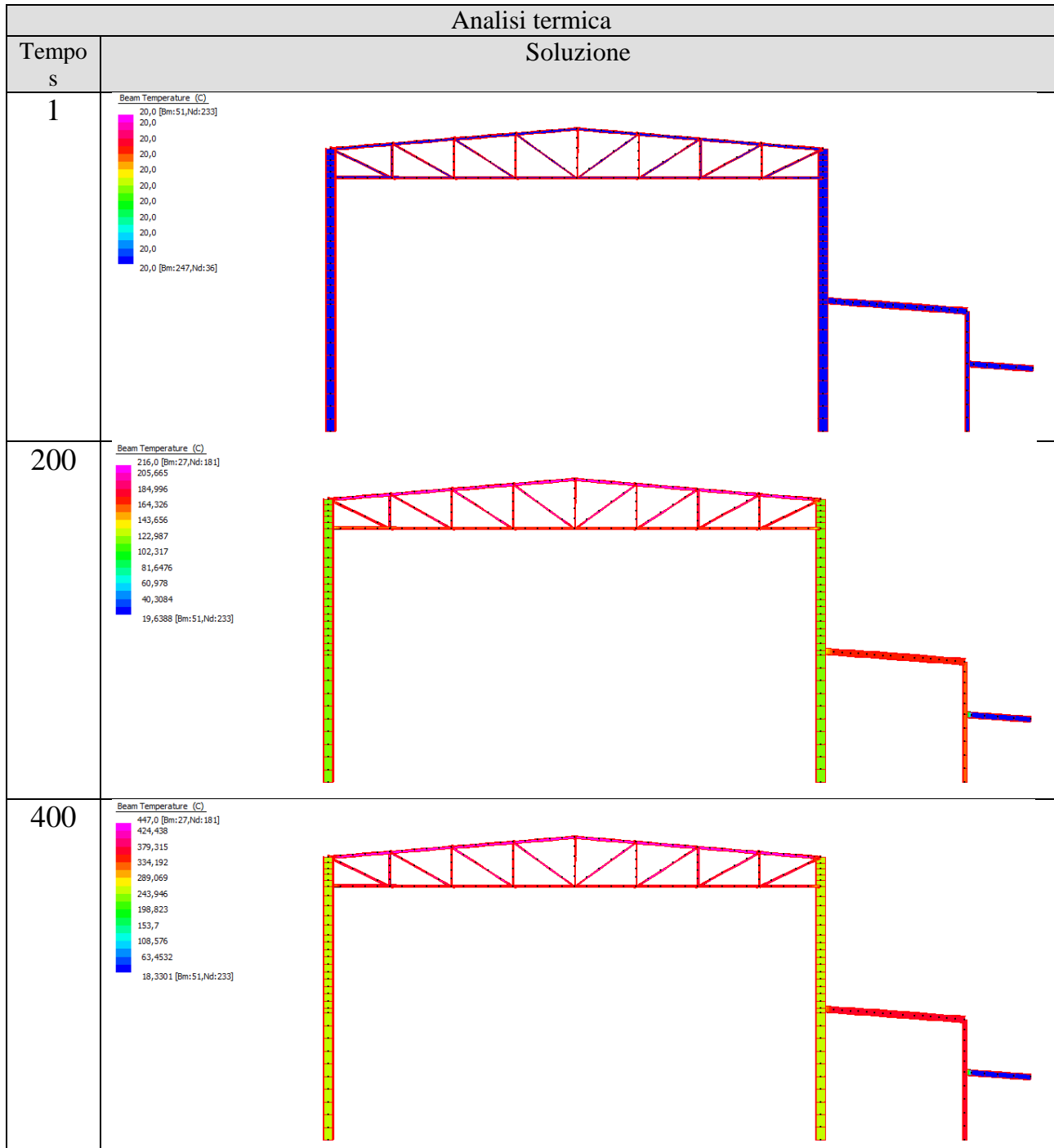
Struttura

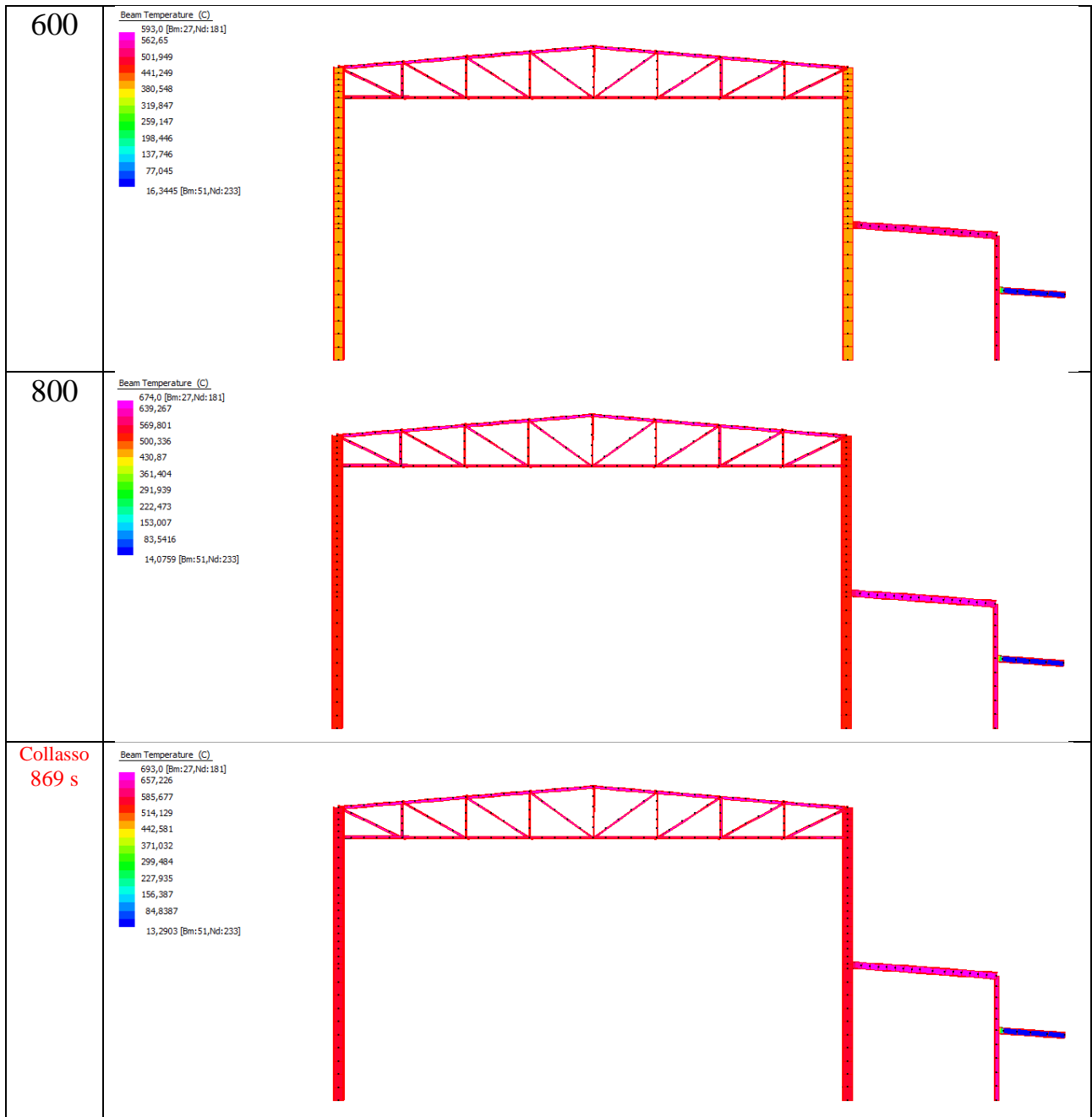
Deformata



Salvando questo modello con imperfezione massima di 0.0015m, si procede con le analisi termomeccaniche. In particolare, si è scelto questo modo in quanto tutta la struttura risulta interessata da una piccola imperfezione iniziale, in modo da studiare le conseguenze sul tipo di collasso.

SCENARIO 1 IMPERFETTO – INCENDIO GENERALIZZATO

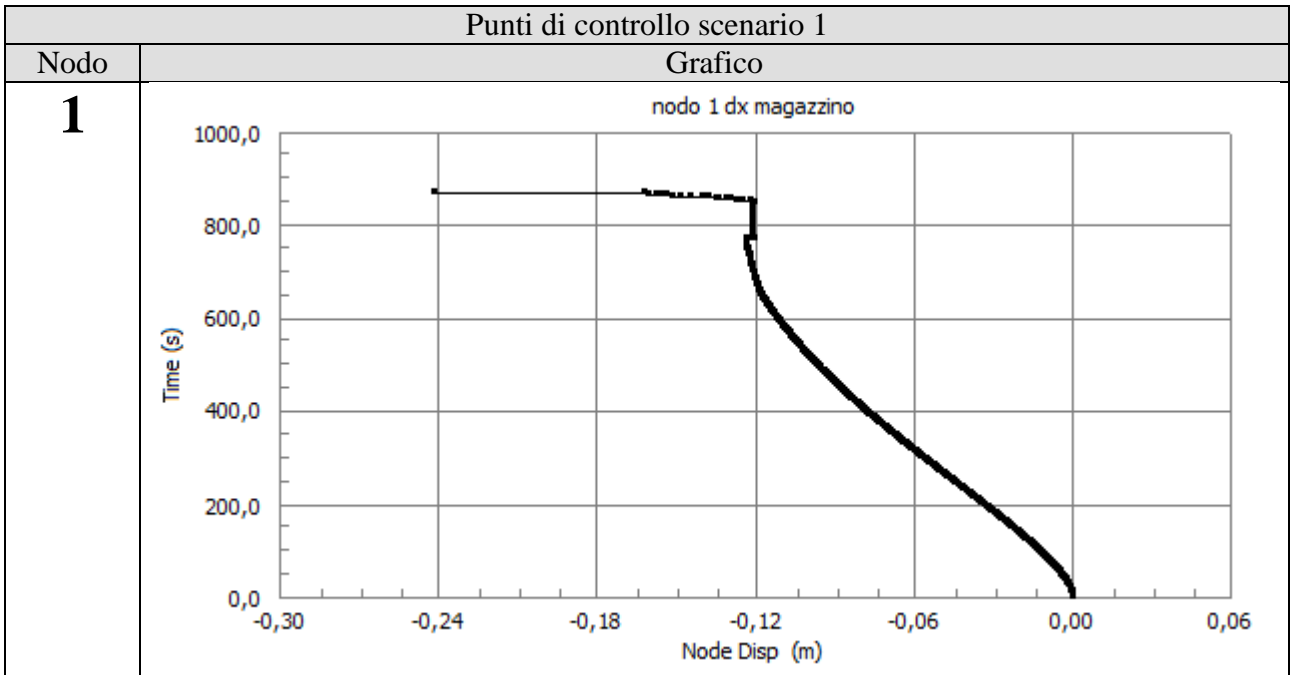
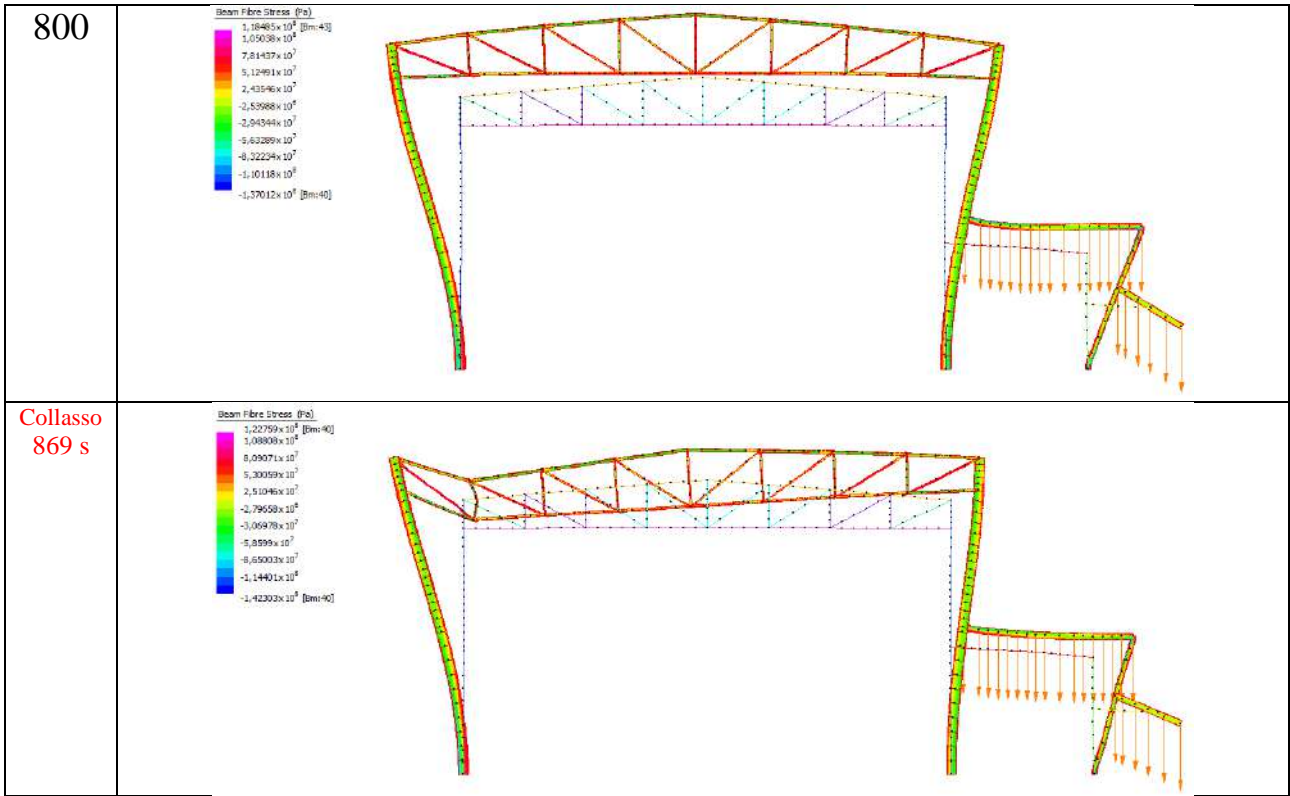


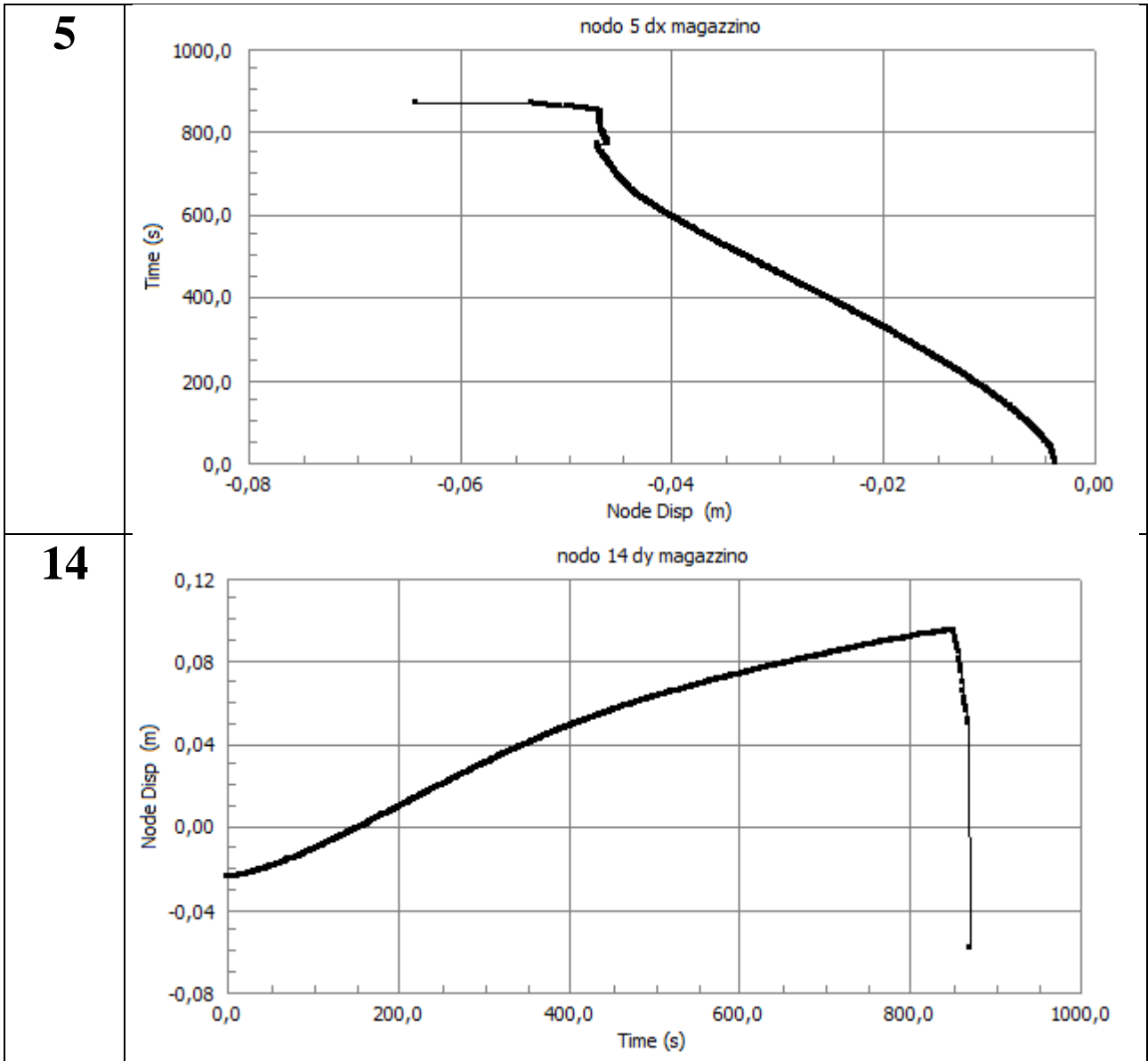


Analisi Meccanica

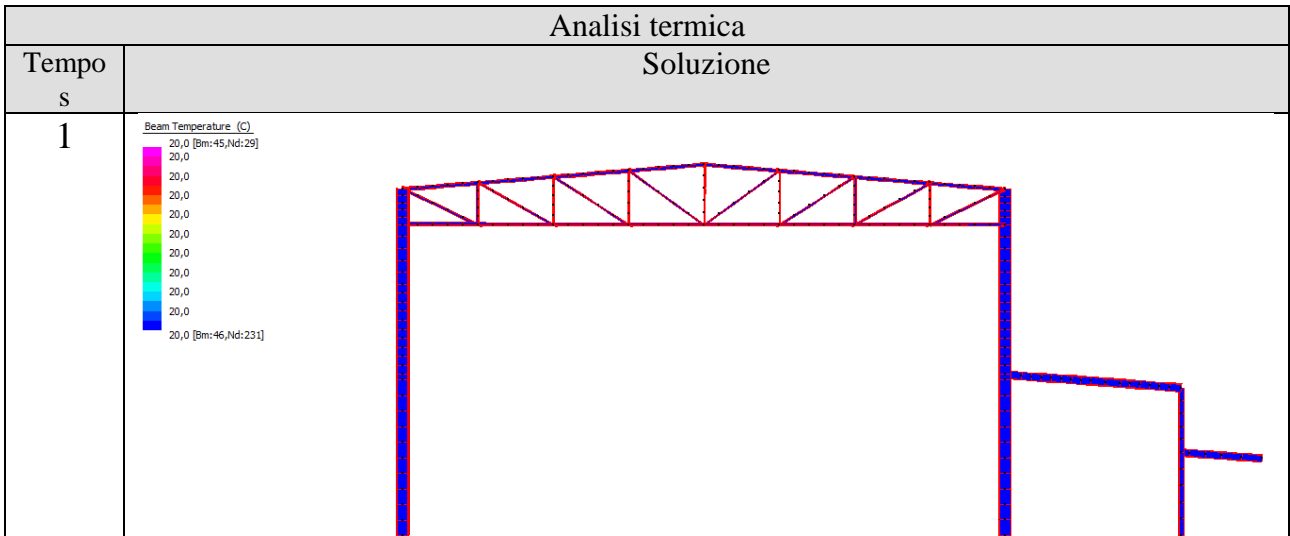
Soluzione

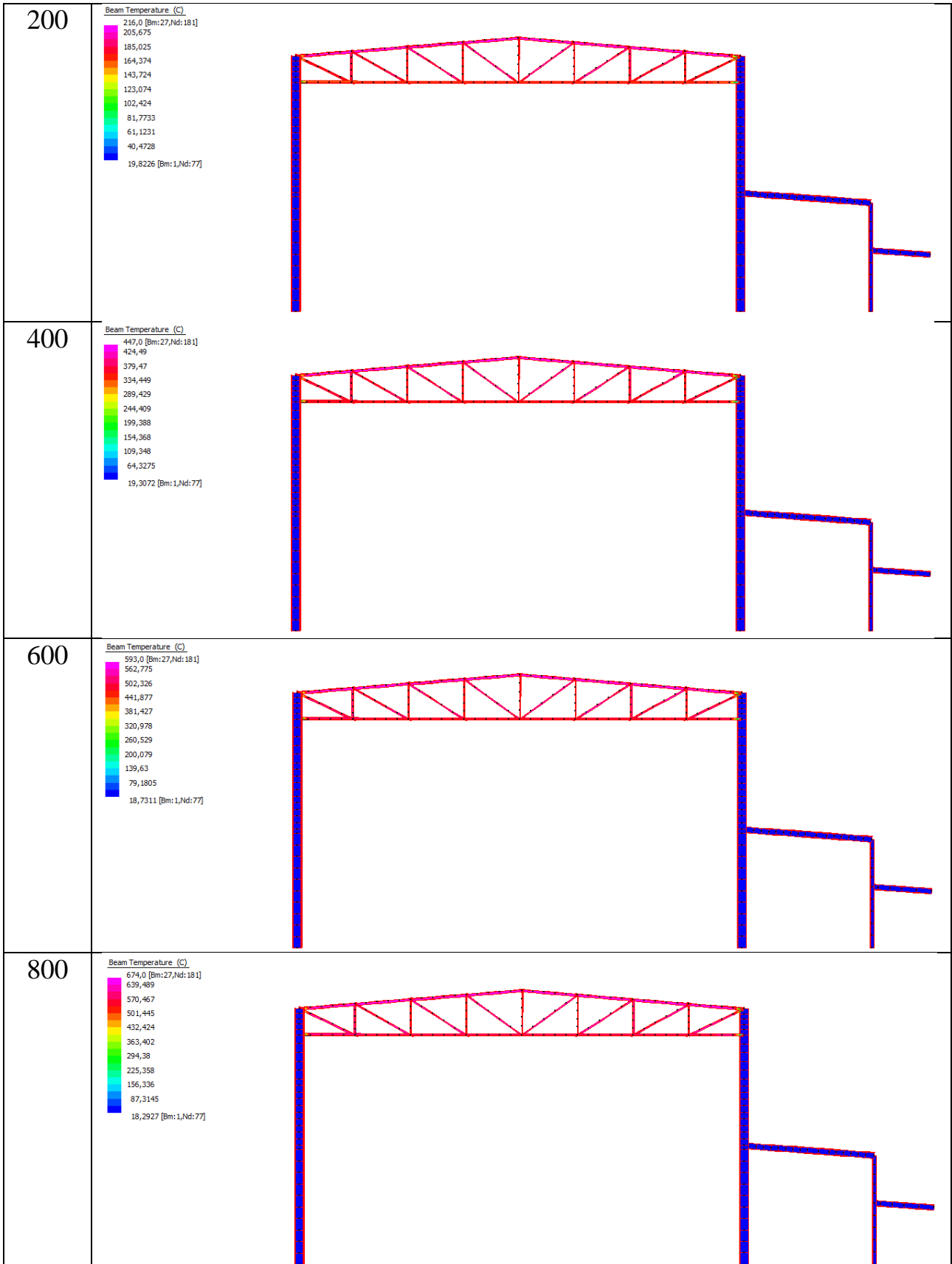
Tempo s	
1	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8.12941 × 10¹⁰ [Bm:360] 7.40848 × 10¹⁰ 5.97743 × 10¹⁰ 4.94638 × 10¹⁰ 3.11533 × 10¹⁰ 1.68428 × 10¹⁰ 2.62224 × 10⁹ -1.27782 × 10⁹ -2.60888 × 10⁹ -4.03993 × 10⁹ -5.47096 × 10⁹ [Bm:130]
200	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8.00136 × 10¹⁰ [Bm:162] 7.24854 × 10¹⁰ 5.7206 × 10¹⁰ 4.21726 × 10¹⁰ 2.70362 × 10¹⁰ 1.39998 × 10¹⁰ -3.29665 × 10⁹ -1.03701 × 10⁹ -3.9506 × 10⁹ -4.86489 × 10⁹ -6.37833 × 10⁹ [Bm:42]
400	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.19714 × 10¹⁰ [Bm:42] 1.0559 × 10¹⁰ 8.02631 × 10⁹ 5.29627 × 10⁹ 2.78623 × 10⁹ 1.36187 × 10⁹ -2.49286 × 10⁹ -5.1239 × 10⁹ -7.7539 × 10⁹ -1.0384 × 10⁹ -1.3014 × 10⁹ [Bm:42]
600	<p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.00591 × 10¹⁰ [Bm:42] 1.47589 × 10⁹ 1.11209 × 10⁹ 7.51816 × 10⁸ 3.89777 × 10⁸ 2.77384 × 10⁸ -2.24301 × 10⁸ -6.9634 × 10⁷ -1.05838 × 10⁸ -1.40242 × 10⁸ -1.76246 × 10⁸ [Bm:42]

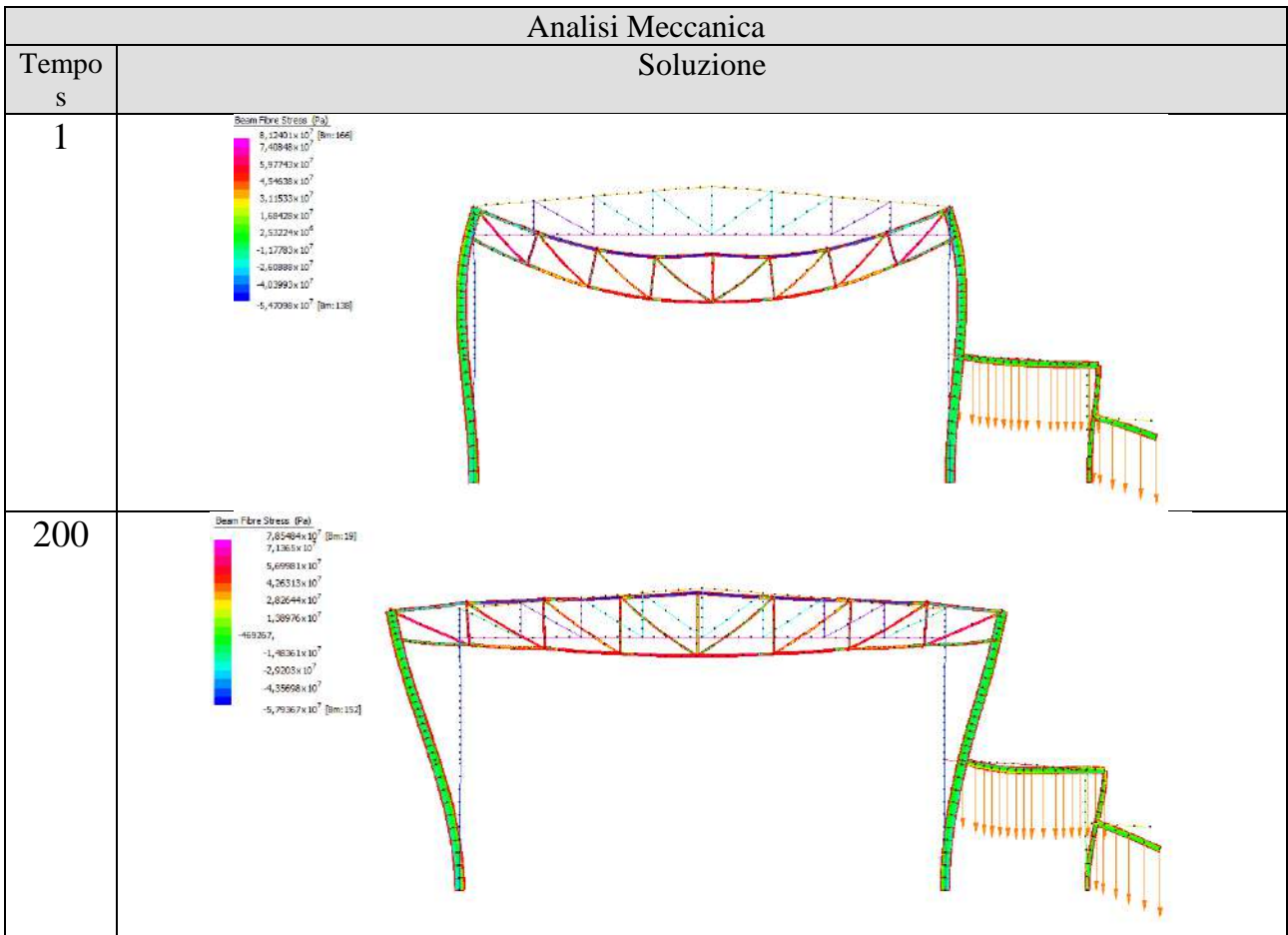
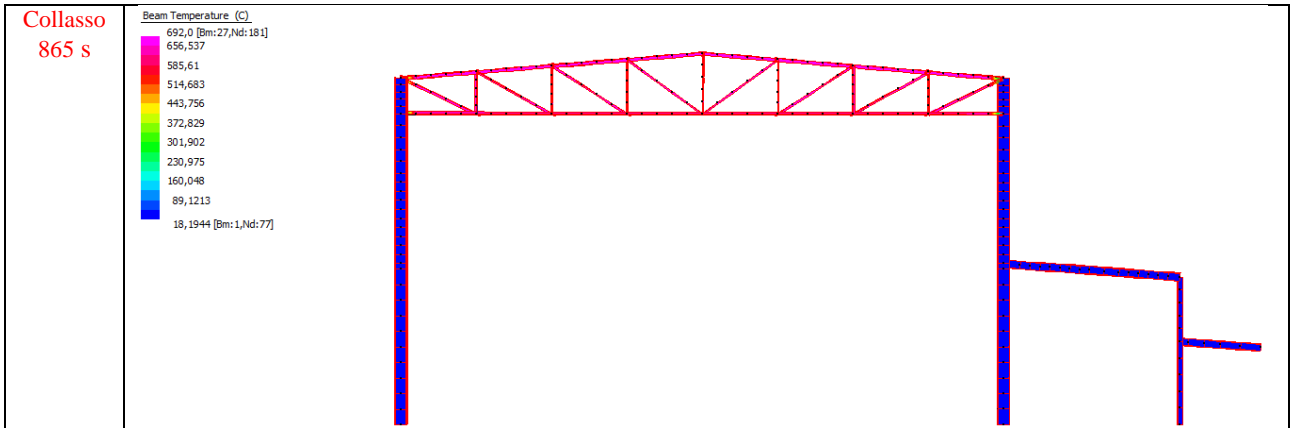


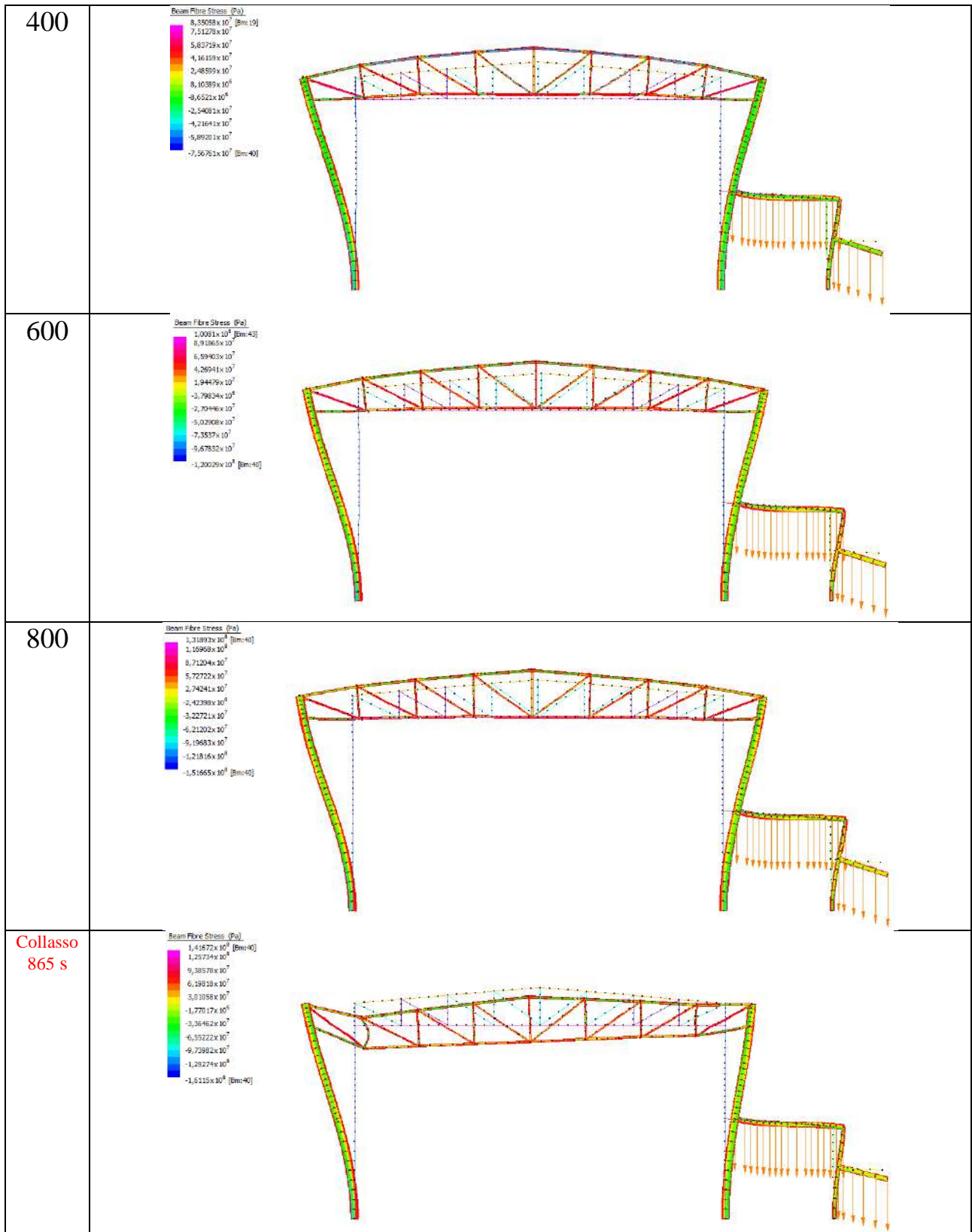


SCENARIO 2 IMPERFETTO – DIFFUSO SU TUTTA LA CAPRIATA





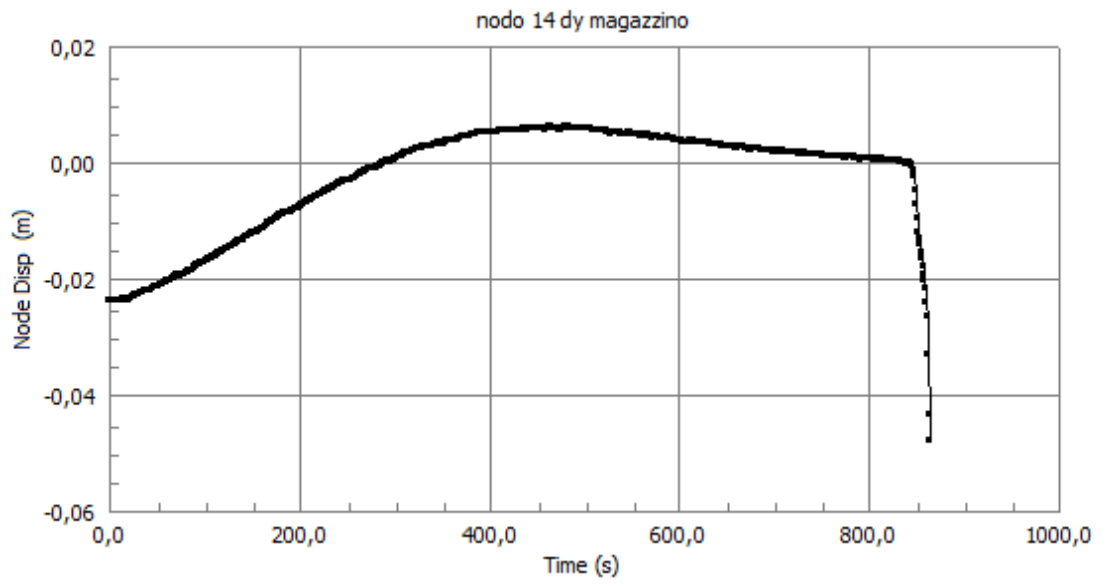




Punti di controllo scenario 2

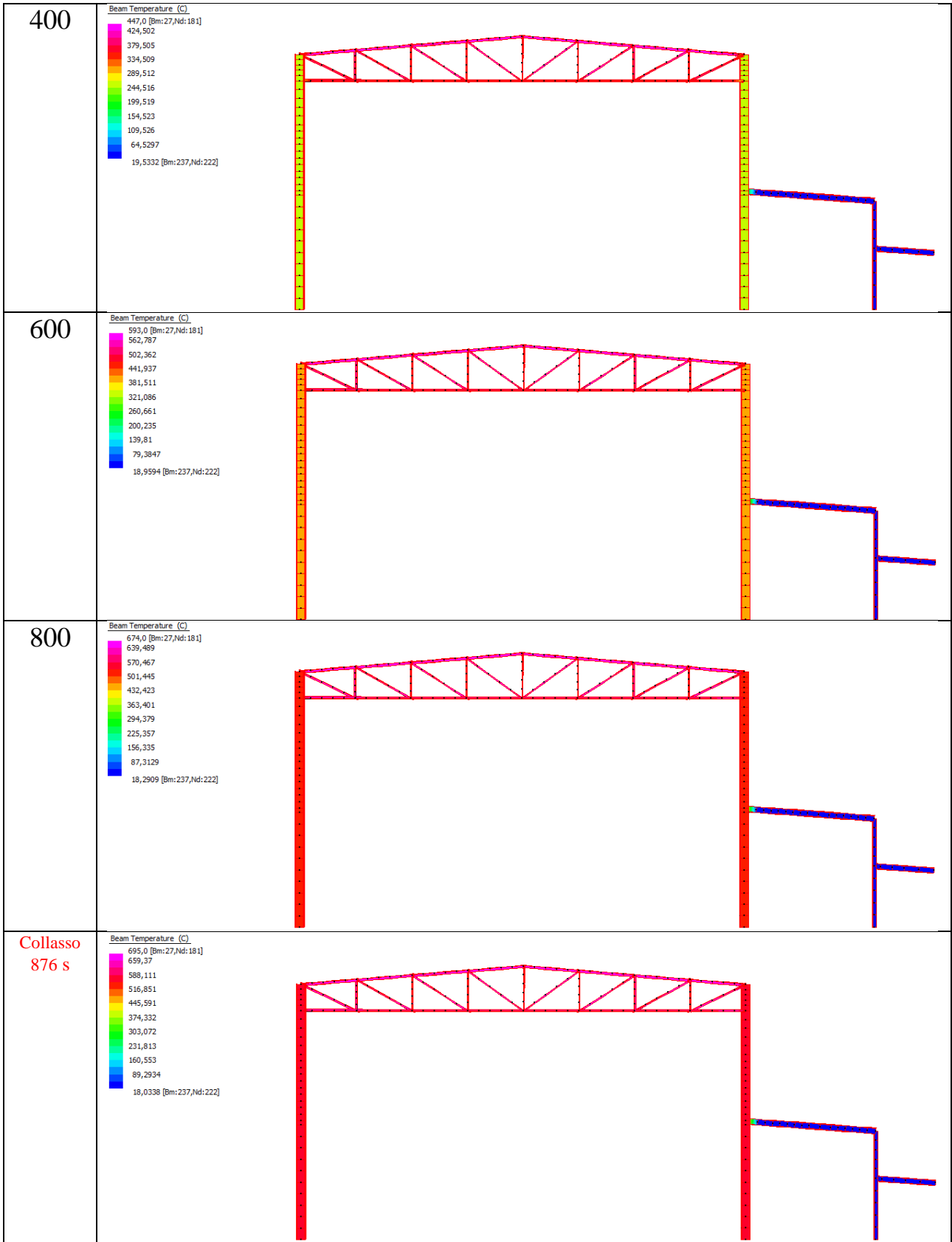
Nodo	Grafico																		
1	<p style="text-align: center;">nodo 1 dx magazzino</p> <table border="1"> <caption>Approximate data for Node 1</caption> <thead> <tr> <th>Node Disp (m)</th> <th>Time (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0,14</td><td>850,0</td></tr> <tr><td>-0,12</td><td>850,0</td></tr> <tr><td>-0,10</td><td>750,0</td></tr> <tr><td>-0,08</td><td>550,0</td></tr> <tr><td>-0,06</td><td>400,0</td></tr> <tr><td>-0,04</td><td>300,0</td></tr> <tr><td>-0,02</td><td>150,0</td></tr> <tr><td>0,00</td><td>0,0</td></tr> </tbody> </table>	Node Disp (m)	Time (s)	-0,14	850,0	-0,12	850,0	-0,10	750,0	-0,08	550,0	-0,06	400,0	-0,04	300,0	-0,02	150,0	0,00	0,0
Node Disp (m)	Time (s)																		
-0,14	850,0																		
-0,12	850,0																		
-0,10	750,0																		
-0,08	550,0																		
-0,06	400,0																		
-0,04	300,0																		
-0,02	150,0																		
0,00	0,0																		
5	<p style="text-align: center;">nodo 5 dx magazzino</p> <table border="1"> <caption>Approximate data for Node 5</caption> <thead> <tr> <th>Node Disp (m)</th> <th>Time (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0,05</td><td>850,0</td></tr> <tr><td>-0,045</td><td>850,0</td></tr> <tr><td>-0,04</td><td>750,0</td></tr> <tr><td>-0,03</td><td>550,0</td></tr> <tr><td>-0,02</td><td>400,0</td></tr> <tr><td>-0,01</td><td>250,0</td></tr> <tr><td>-0,005</td><td>0,0</td></tr> </tbody> </table>	Node Disp (m)	Time (s)	-0,05	850,0	-0,045	850,0	-0,04	750,0	-0,03	550,0	-0,02	400,0	-0,01	250,0	-0,005	0,0		
Node Disp (m)	Time (s)																		
-0,05	850,0																		
-0,045	850,0																		
-0,04	750,0																		
-0,03	550,0																		
-0,02	400,0																		
-0,01	250,0																		
-0,005	0,0																		

14



SCENARIO 3 IMPERFETTO – DIFFUSO SU TUTTO IL MAGAZZINO

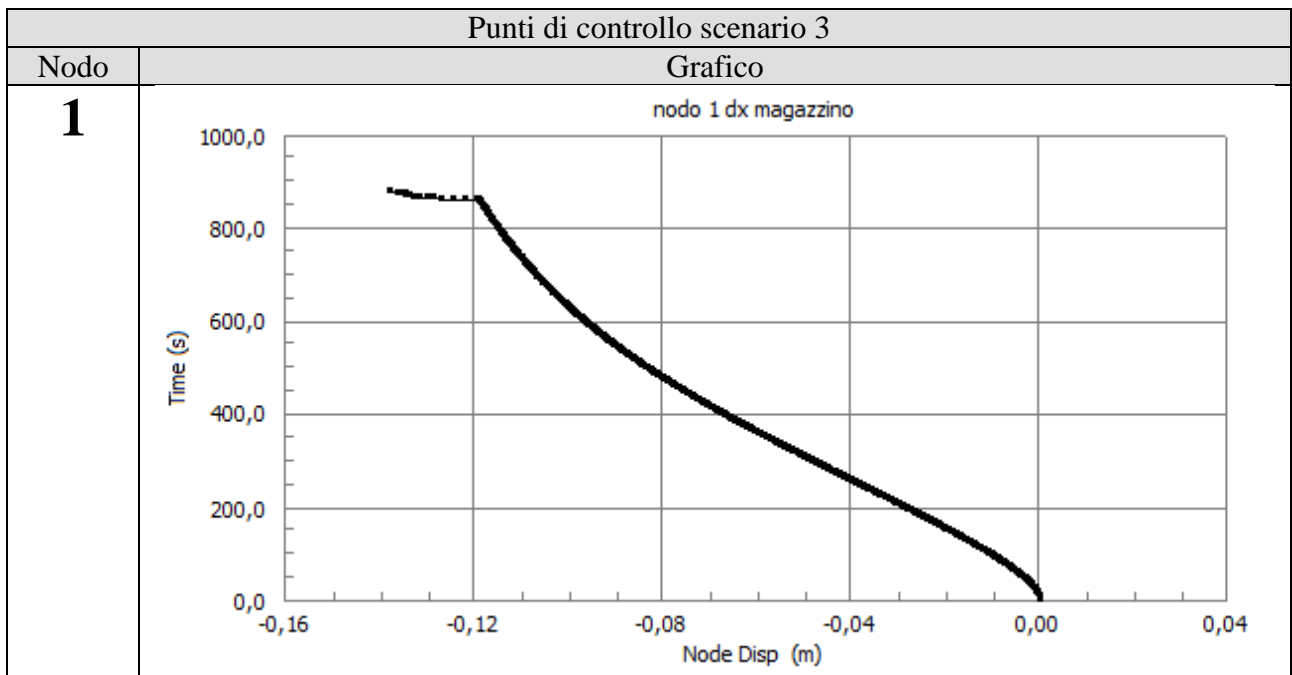
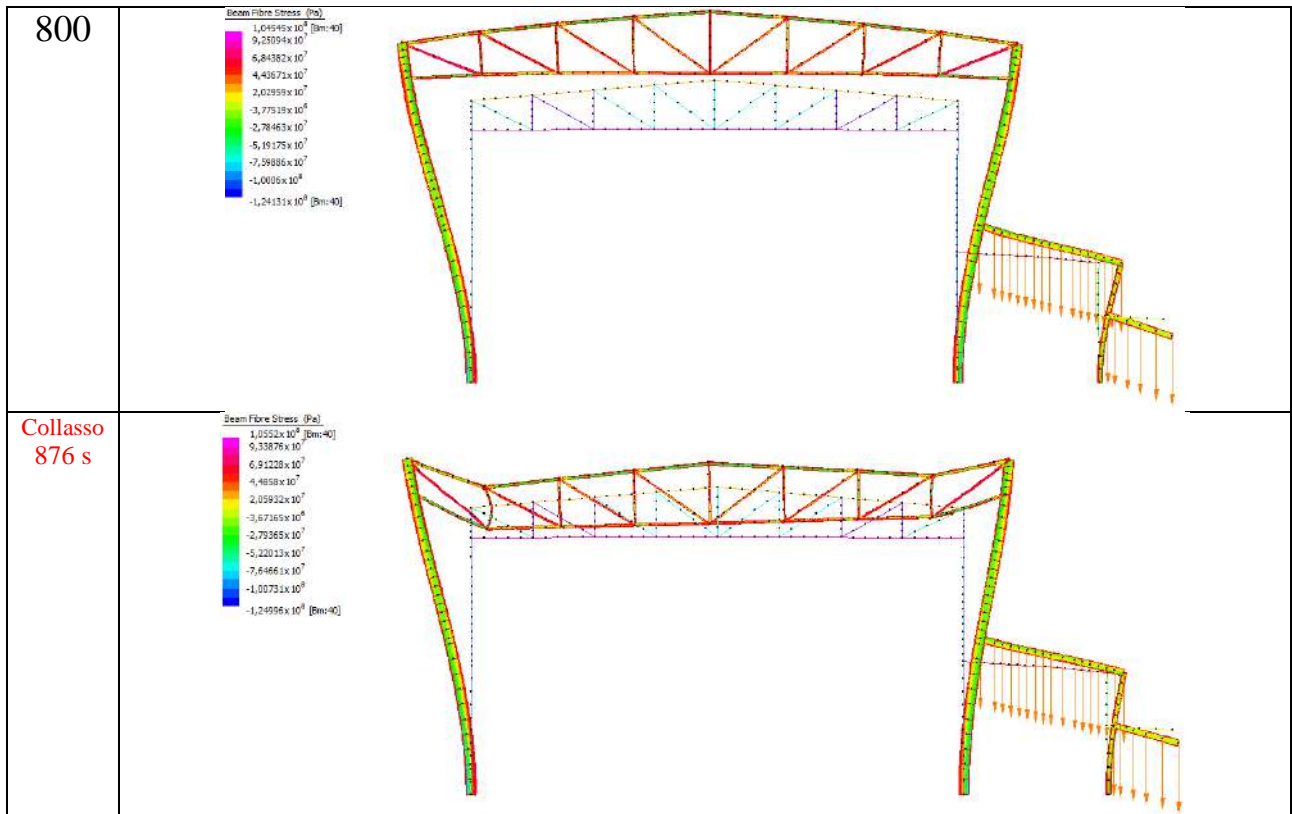
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	
200	



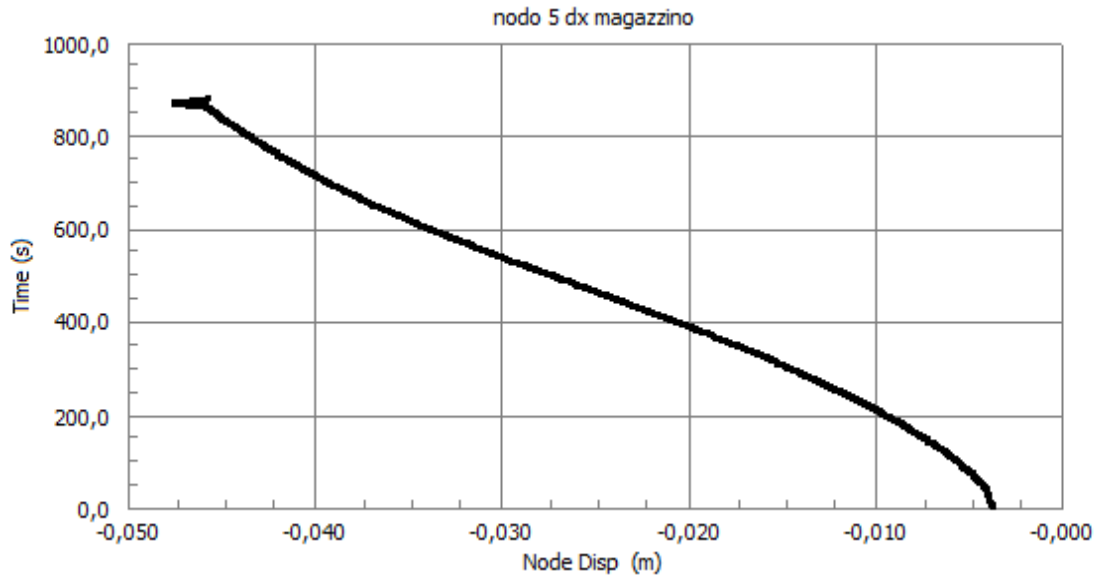
Analisi Meccanica

Soluzione

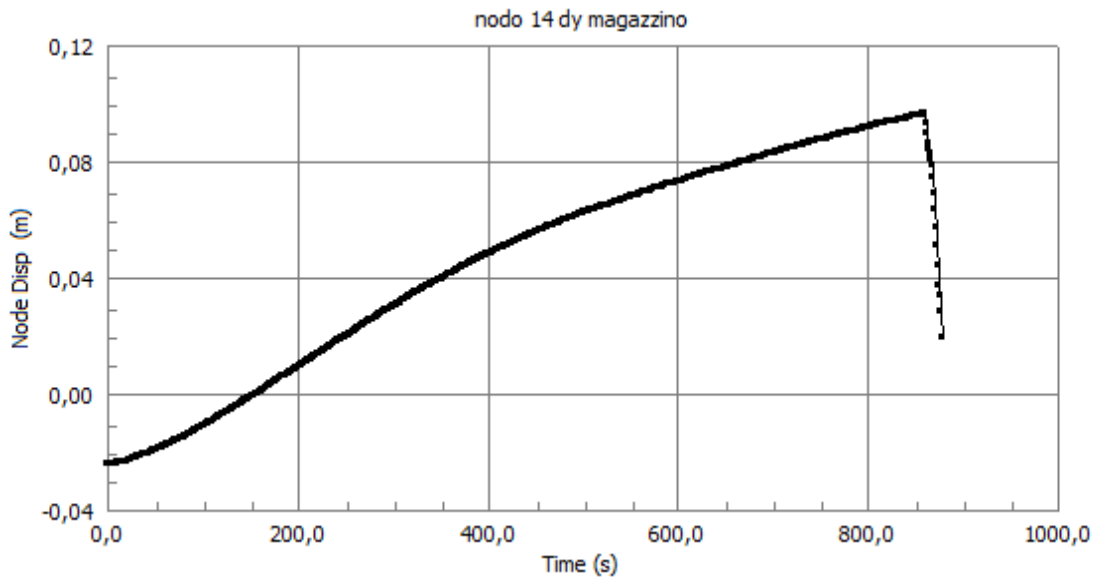
Tempo s	
1	
200	
400	
600	



5

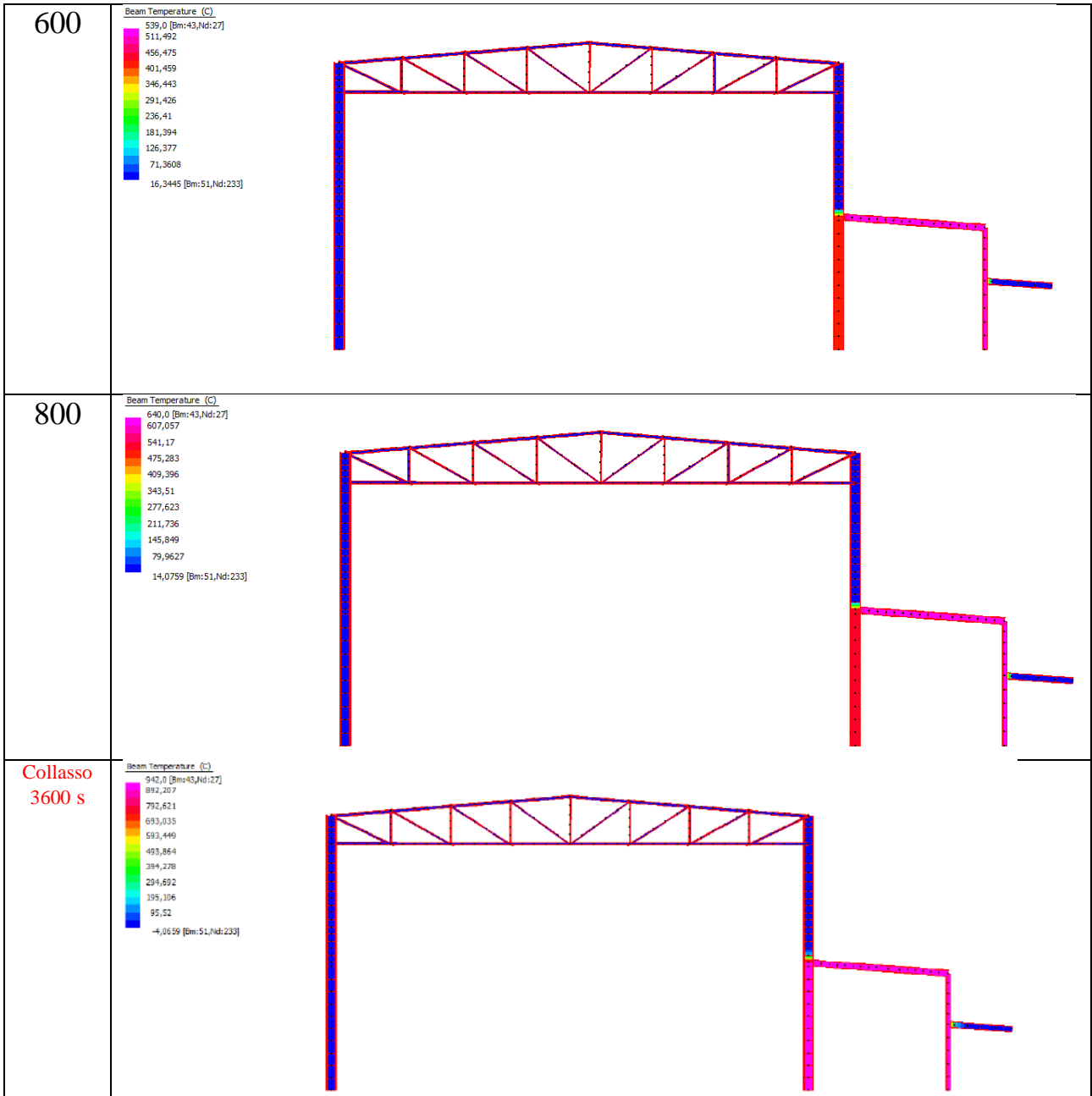


14



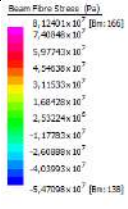
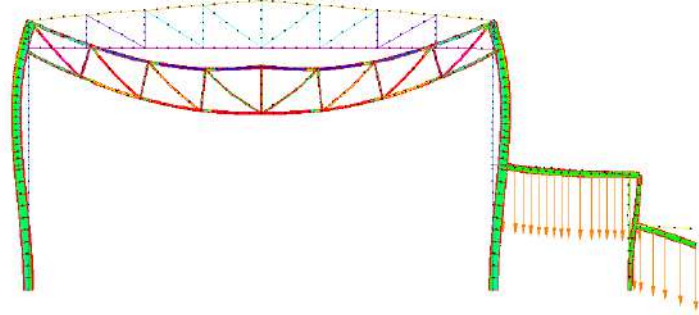
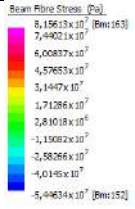
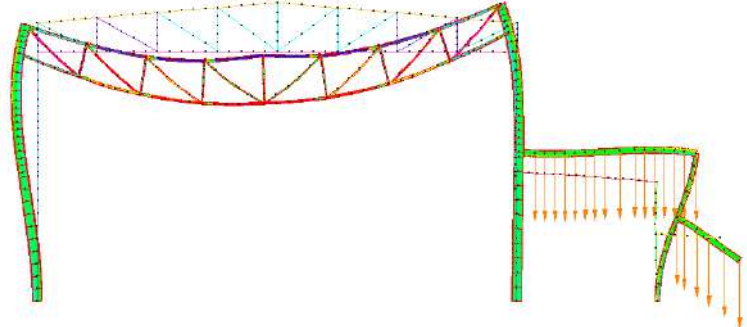
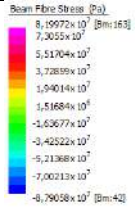
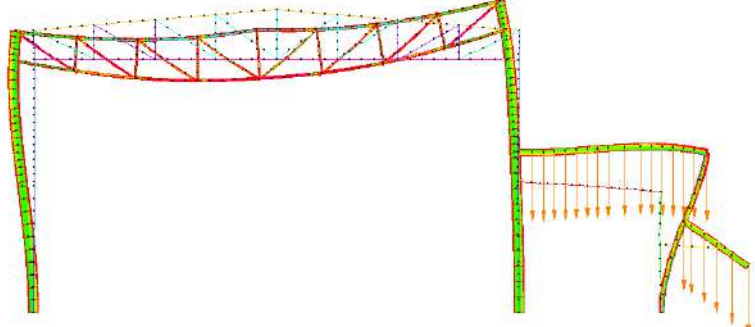
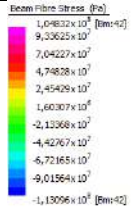
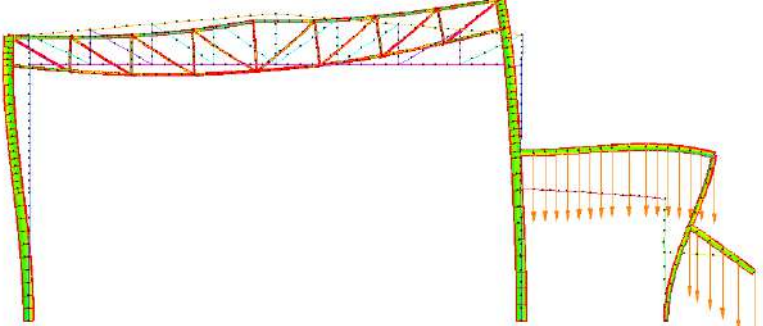
SCENARIO 4 IMPERFETTO – LOCALE COLLETTAME

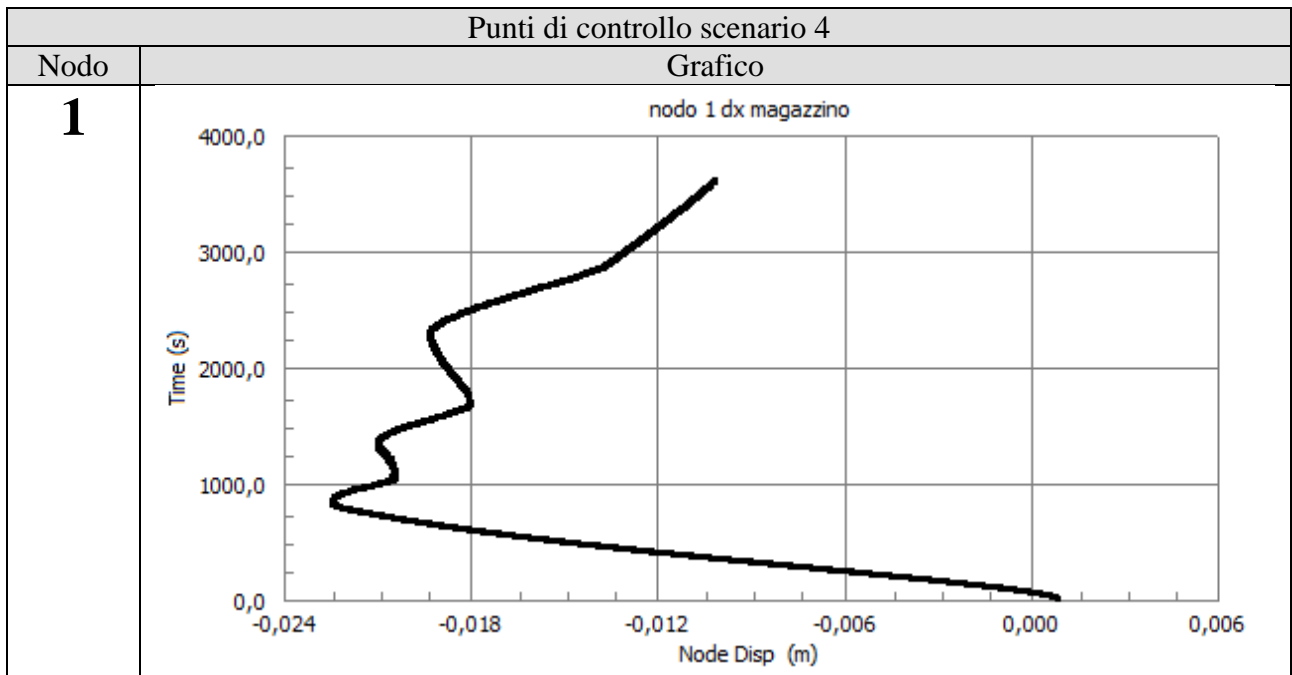
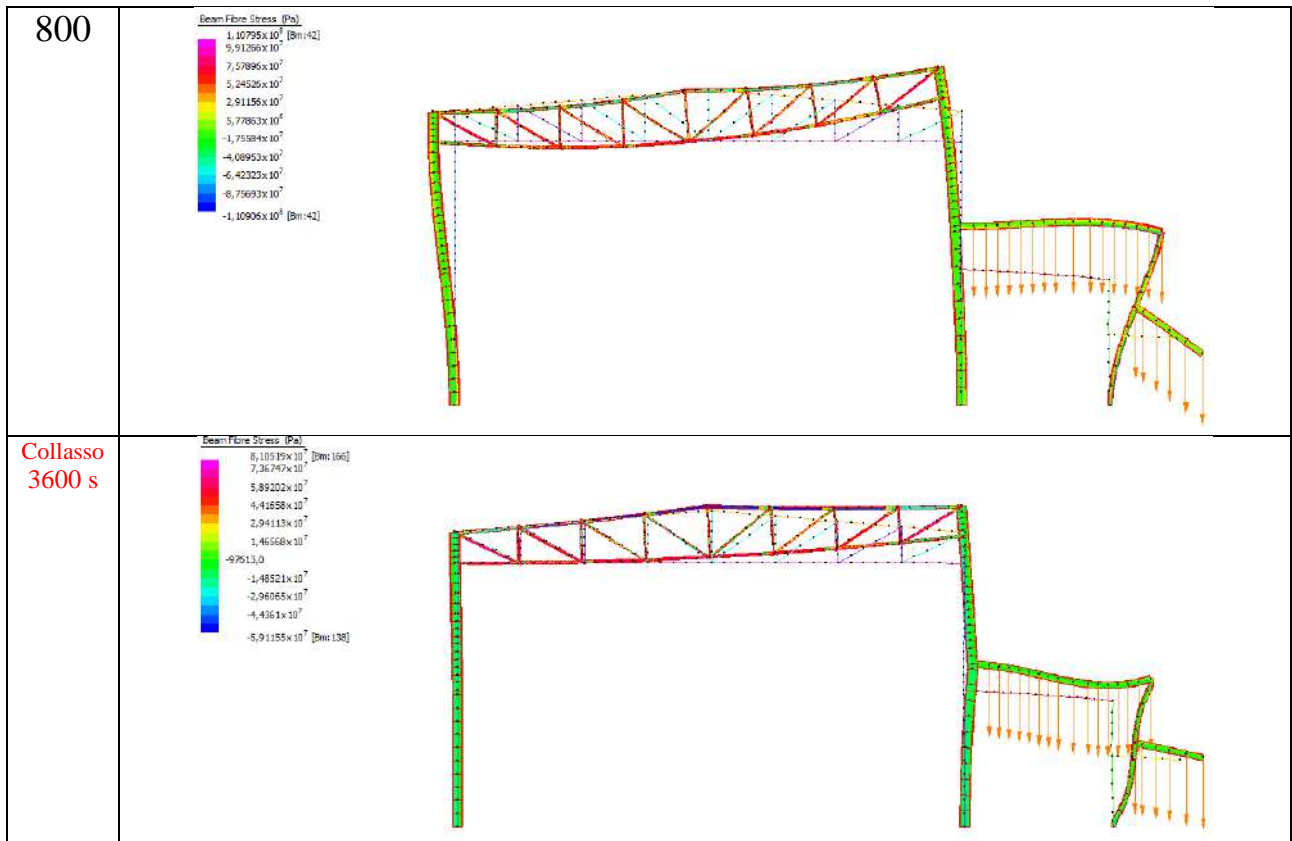
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C)</p> <p>20,0 [Bm:36,Nd:2] 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 [Bm:3,Nd:85]</p>
200	<p>Beam Temperature (C)</p> <p>173,0 [Bm:43,Nd:27] 164,928 148,785 132,642 116,499 100,355 84,2119 68,0686 51,9254 35,7821 19,6388 [Bm:51,Nd:233]</p>
400	<p>Beam Temperature (C)</p> <p>379,0 [Bm:43,Nd:27] 360,017 322,052 284,087 246,122 208,156 170,191 132,226 94,2606 56,2954 18,3301 [Bm:51,Nd:233]</p>

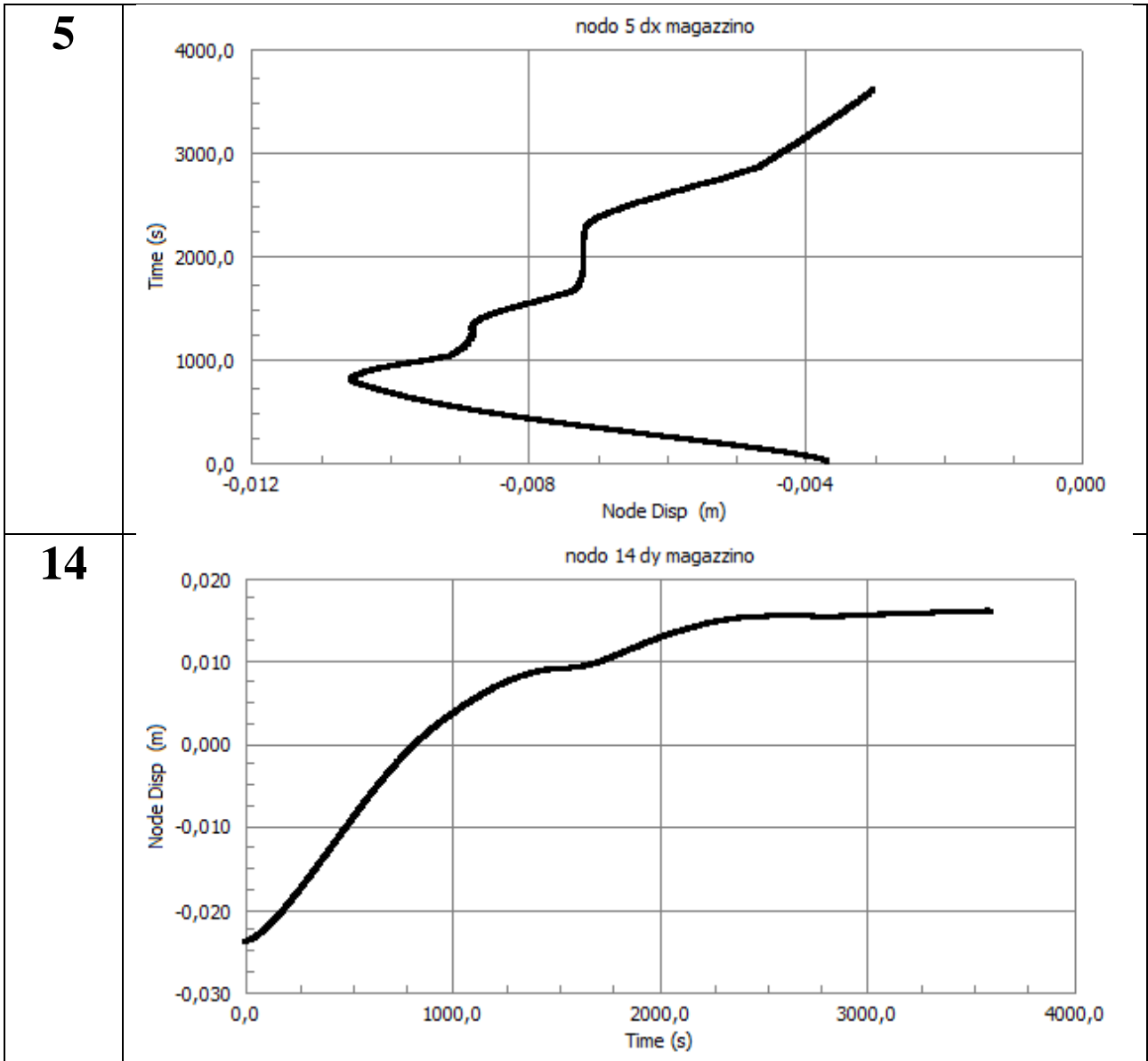


Analisi Meccanica

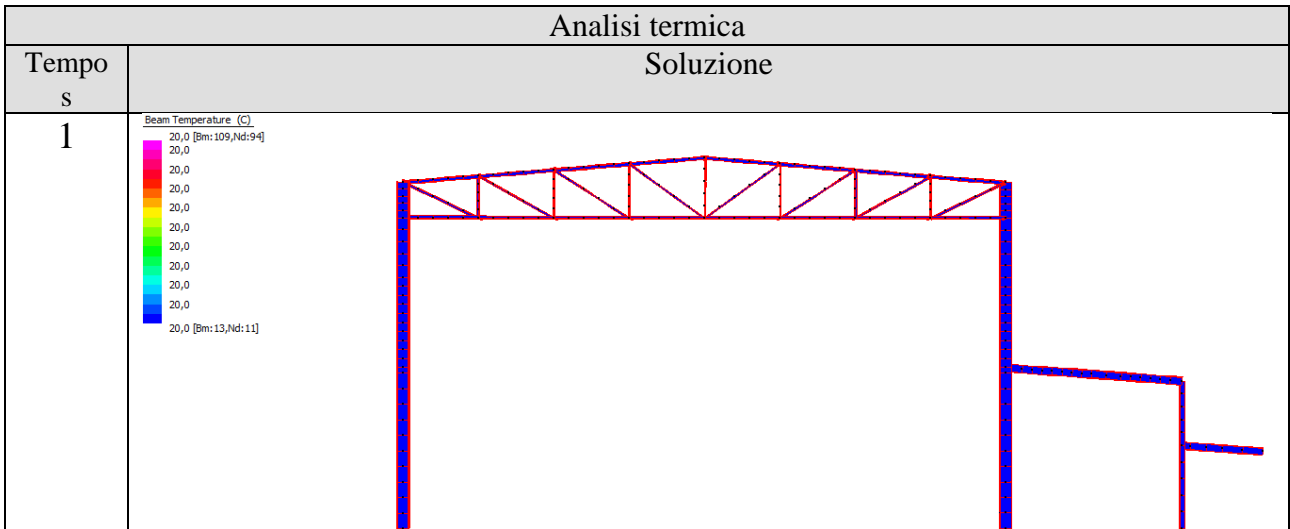
Soluzione

Tempo s	
1	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8,12421x10⁷ [Em:166] 7,40148x10⁷ 5,97743x10⁷ 4,94638x10⁷ 3,11533x10⁷ 1,68428x10⁷ 2,53224x10⁶ -1,17802x10⁷ -2,66889x10⁷ -4,03993x10⁷ -5,47098x10⁷ [Em:138] 
200	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8,19613x10⁷ [Em:163] 7,44021x10⁷ 6,00837x10⁷ 4,57653x10⁷ 3,1447x10⁷ 1,71286x10⁷ 2,81018x10⁶ -1,19082x10⁷ -2,58266x10⁷ -4,0145x10⁷ -5,44834x10⁷ [Em:152] 
400	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8,19072x10⁷ [Em:163] 7,30355x10⁷ 5,51704x10⁷ 3,72859x10⁷ 1,94014x10⁷ 1,51684x10⁶ -3,63677x10⁷ -4,2522x10⁷ -5,21388x10⁷ -7,00213x10⁷ -8,79038x10⁷ [Em:42] 
600	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1,04832x10⁸ [Em:42] 9,33625x10⁷ 7,04227x10⁷ 4,74828x10⁷ 2,45429x10⁷ 1,60307x10⁶ -2,13368x10⁷ -4,42767x10⁷ -6,72165x10⁷ -9,01964x10⁷ -1,13096x10⁸ [Em:42] 

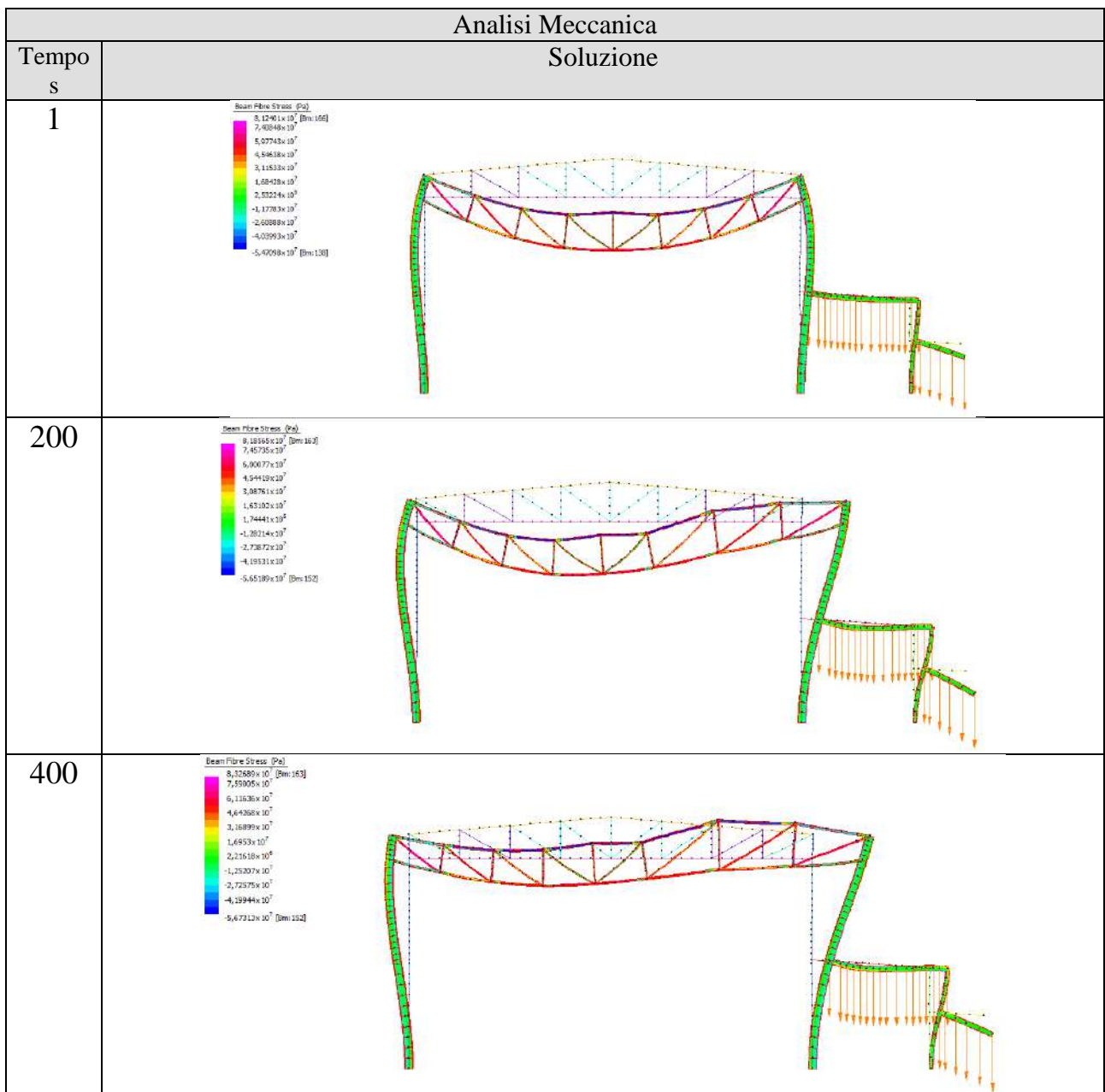
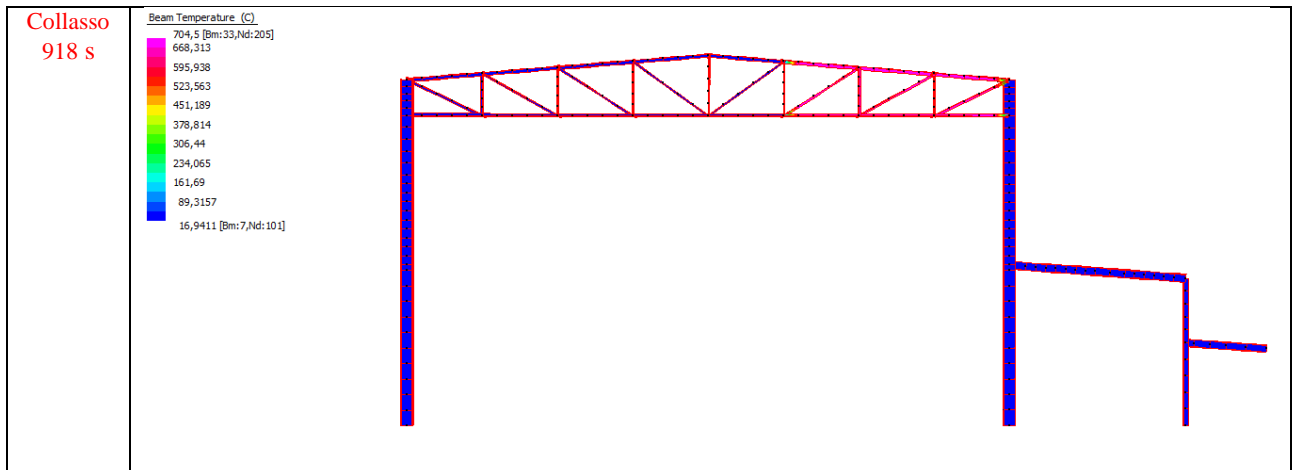


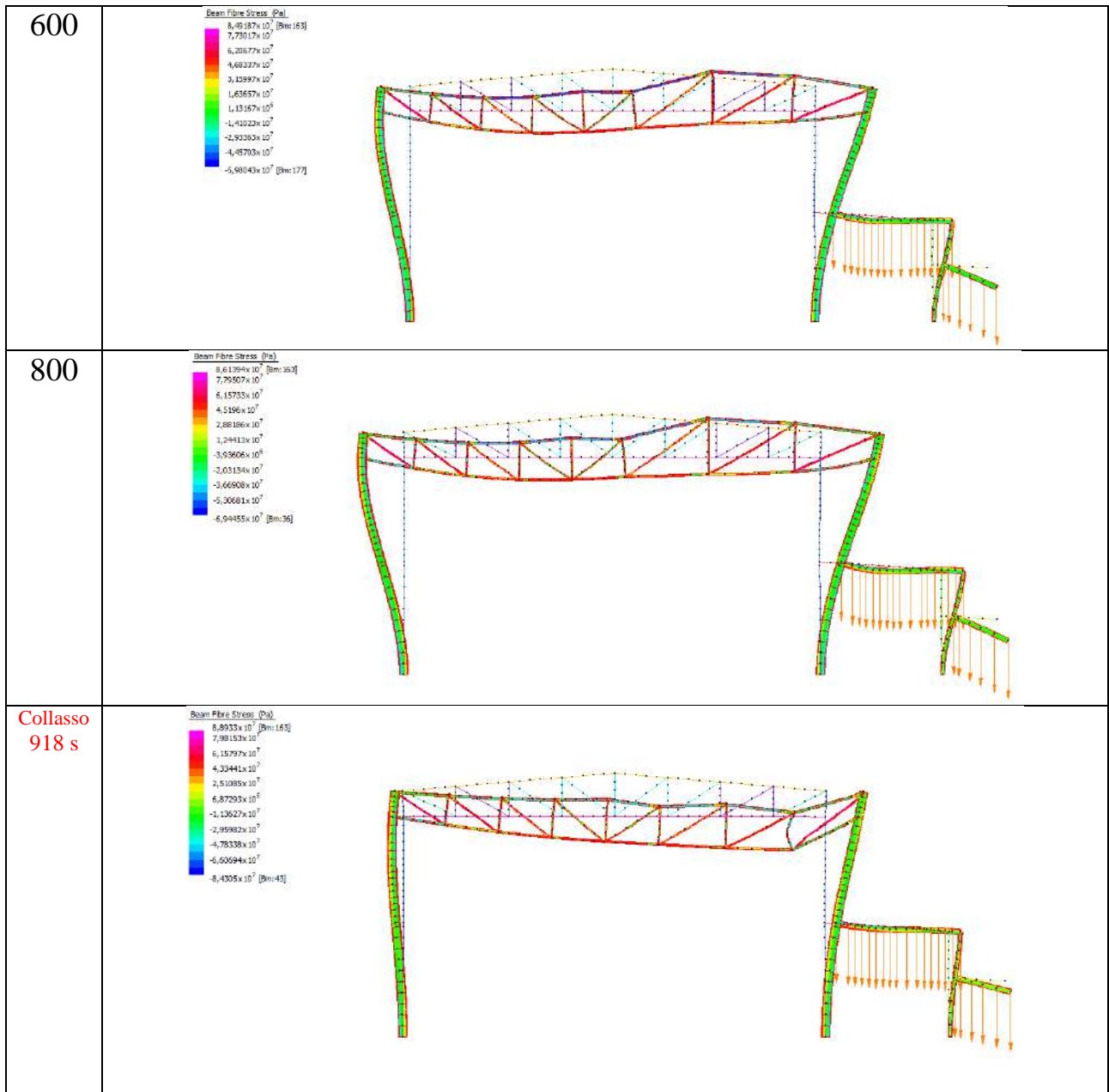


SCENARIO 5 IMPERFETTO – CAPRIATA MAGAZZINO LATO DESTRO





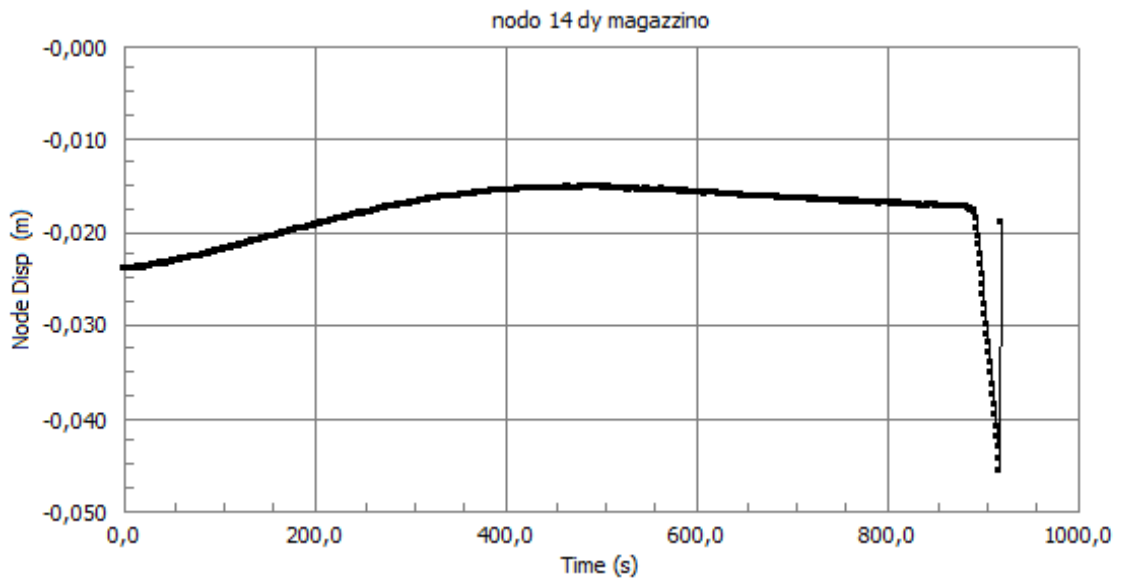




Punti di controllo scenario 5

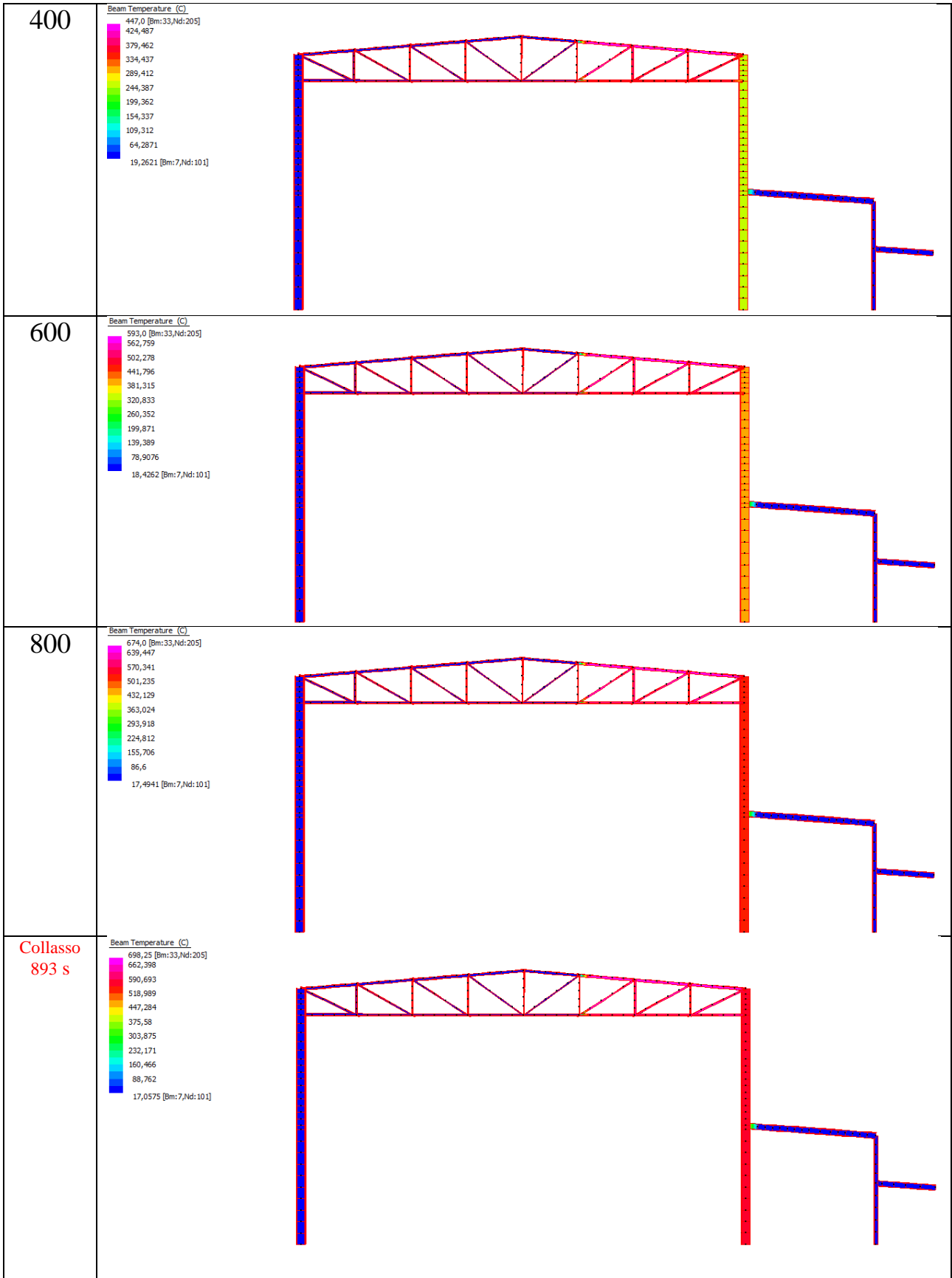
Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p>nodo 1 dx magazzino</p>
<p>5</p>	<p>nodo 5 dx magazzino</p>

14



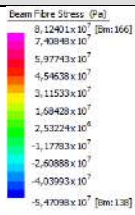
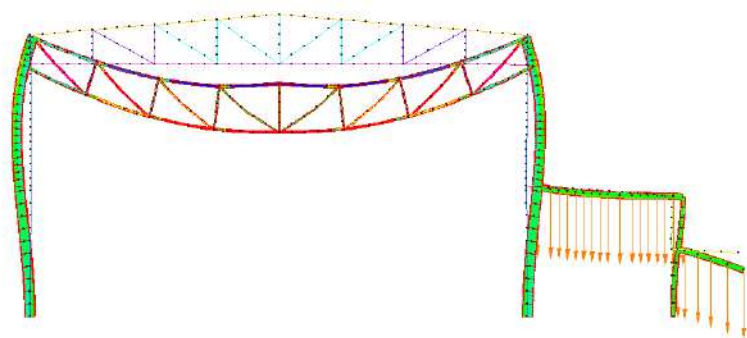
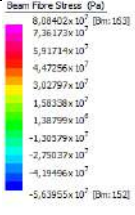
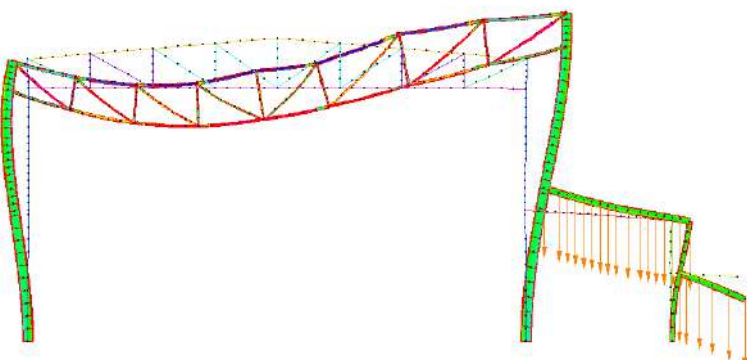
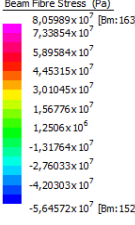
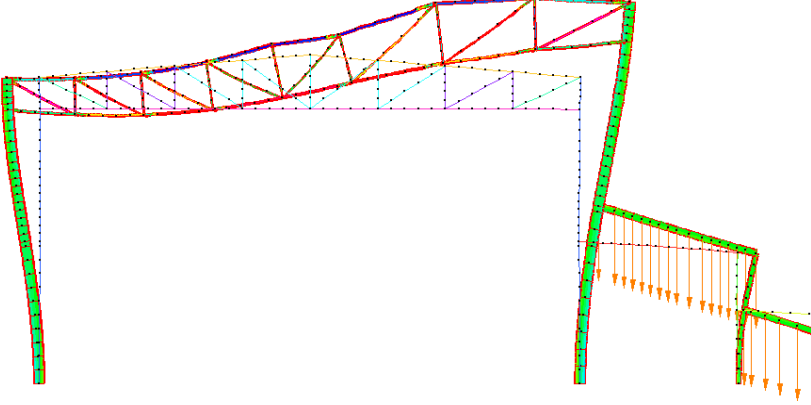
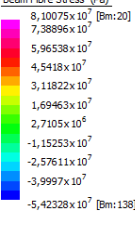
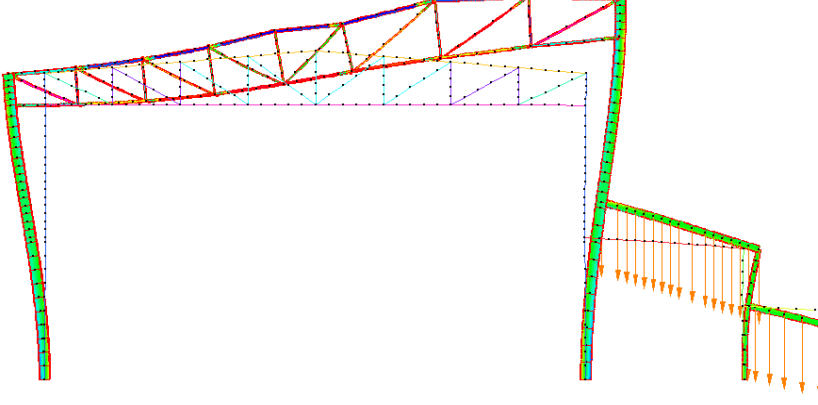
SCENARIO 6 IMPERFETTO – CAPRIATA MAGAZZINO LATO DESTRO E PILASTRO DESTRO

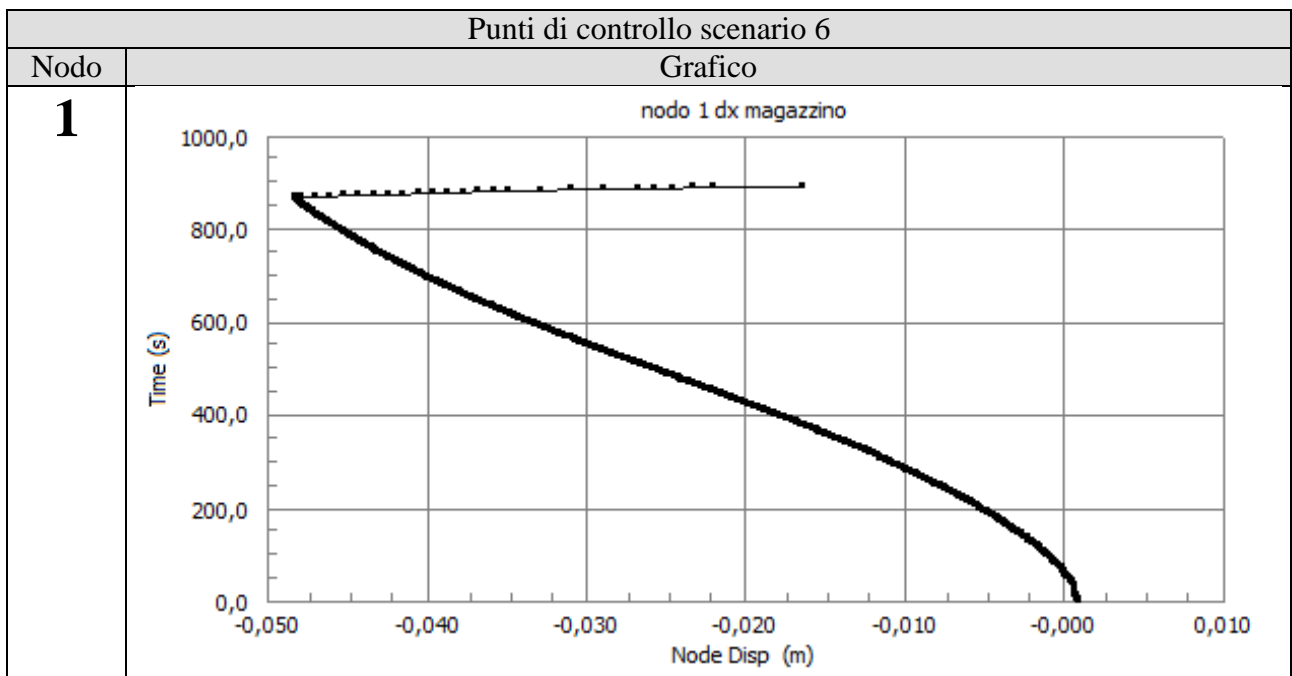
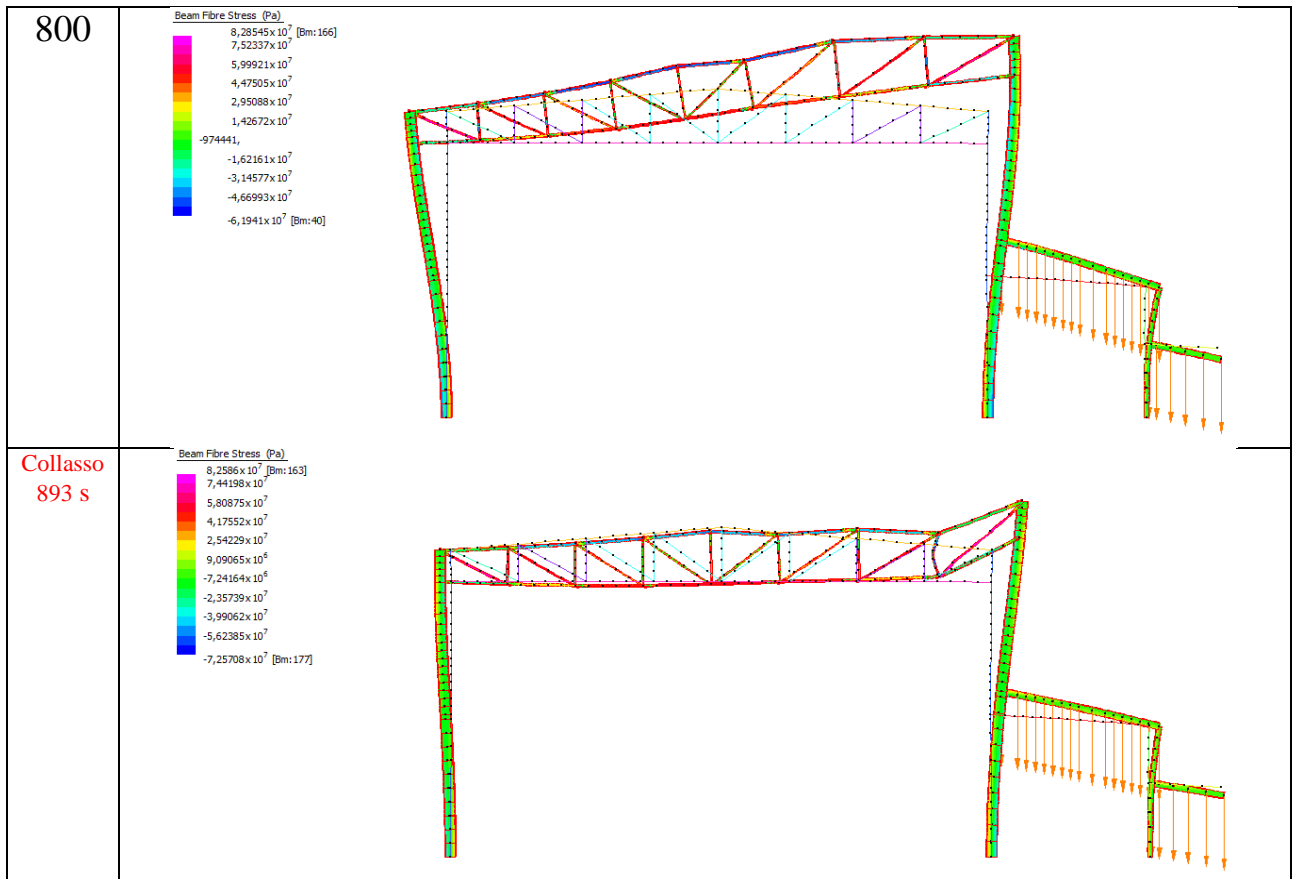
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C) 20,0 [Bm:109,Nd:94] 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 20,0 [Bm:13,Nd:11]</p>
200	<p>Beam Temperature (C) 216,0 [Bm:33,Nd:205] 205,676 185,027 164,378 143,729 123,08 102,431 81,7819 61,1329 40,484 19,8351 [Bm:7,Nd:101]</p>



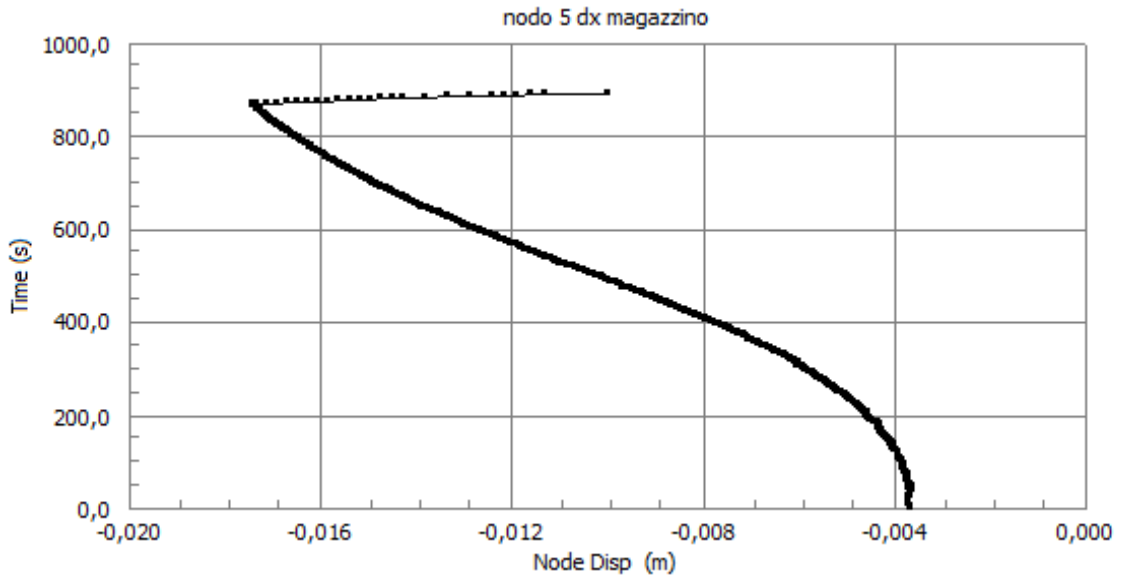
Analisi Meccanica

Soluzione

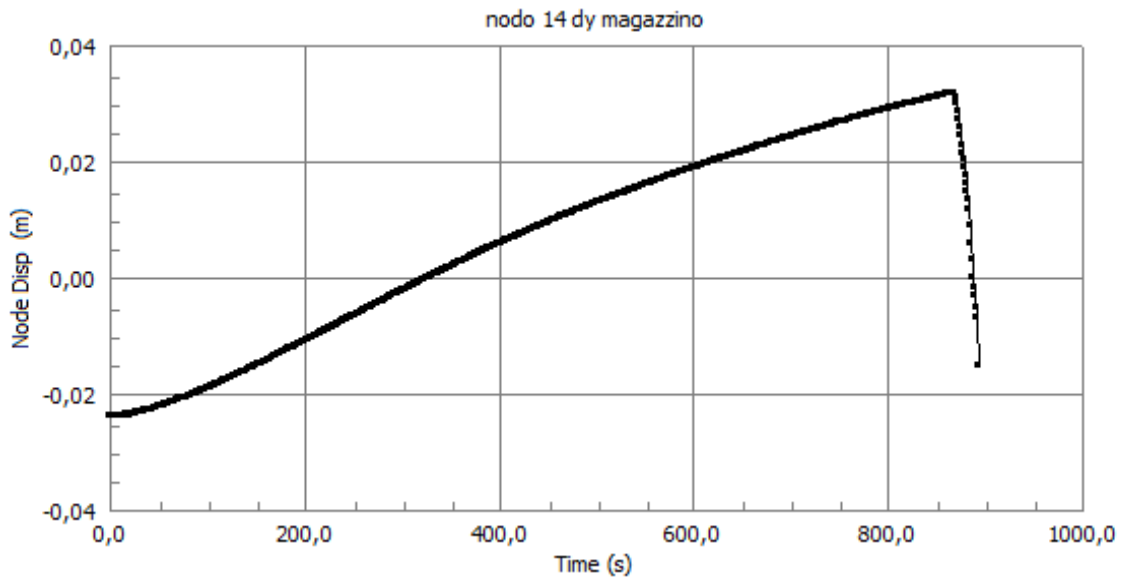
Tempo s	
1	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8.12401x10⁷ [Bm:166] 7.40848x10⁷ 5.97743x10⁷ 4.54638x10⁷ 3.11533x10⁷ 1.68428x10⁷ 2.53224x10⁶ -1.1783x10⁷ -2.60888x10⁷ -4.03993x10⁷ -5.47098x10⁷ [Bm:138] 
200	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8.08402x10⁷ [Bm:163] 7.36173x10⁷ 5.91714x10⁷ 4.47256x10⁷ 3.02797x10⁷ 1.58338x10⁷ 1.38799x10⁶ -1.30279x10⁷ -2.75037x10⁷ -4.39496x10⁷ -5.63955x10⁷ [Bm:152] 
400	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8.05989x10⁷ [Bm:163] 7.33854x10⁷ 5.89584x10⁷ 4.45315x10⁷ 3.01045x10⁷ 1.56776x10⁷ 1.2506x10⁶ -1.31764x10⁷ -2.76033x10⁷ -4.20303x10⁷ -5.64572x10⁷ [Bm:152] 
600	 <p>Beam Fibre Stress (Pa)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8.10075x10⁷ [Bm:20] 7.38896x10⁷ 5.96538x10⁷ 4.5418x10⁷ 3.11822x10⁷ 1.69463x10⁷ 2.7105x10⁶ -1.15253x10⁷ -2.57611x10⁷ -3.9997x10⁷ -5.42328x10⁷ [Bm:138] 



5

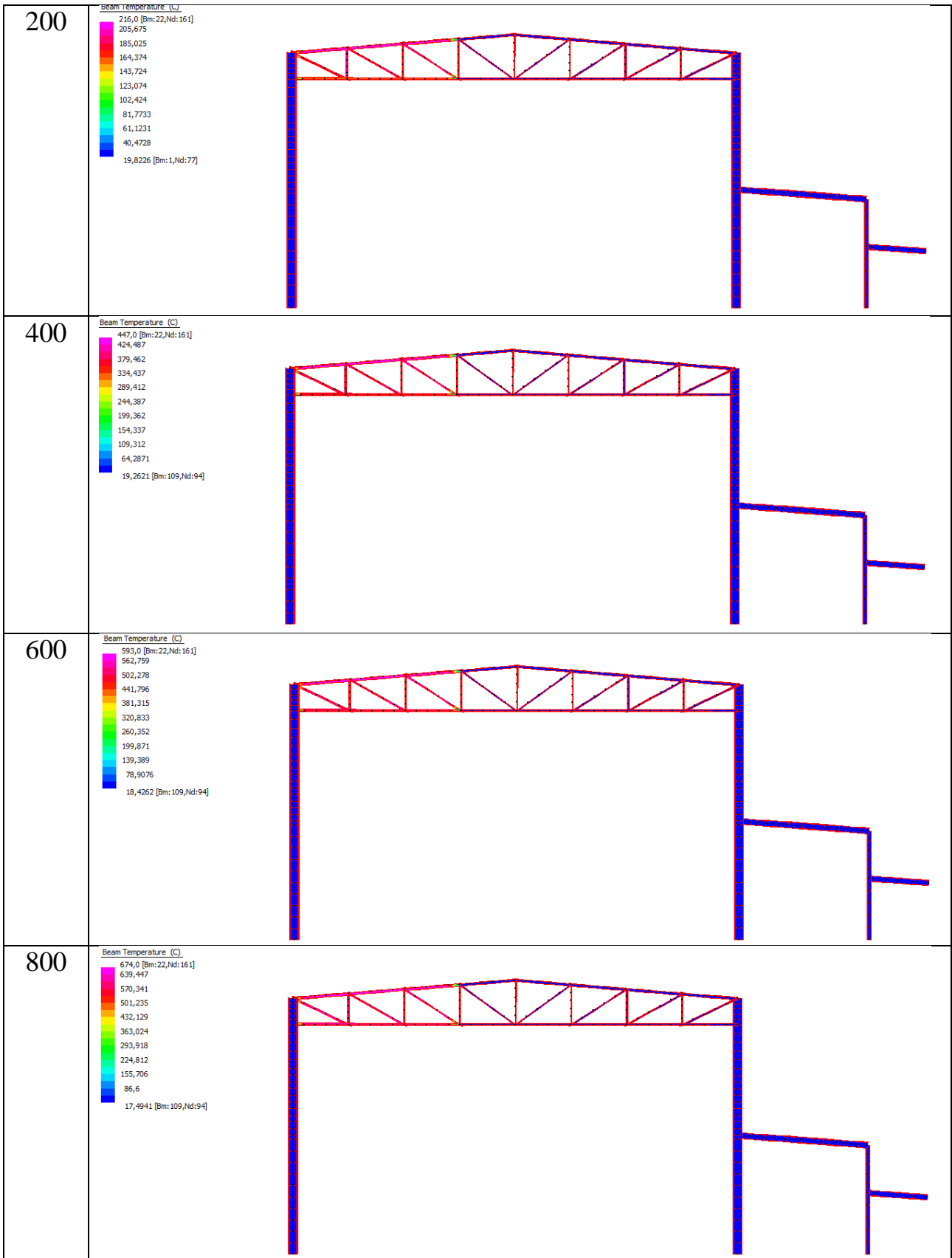


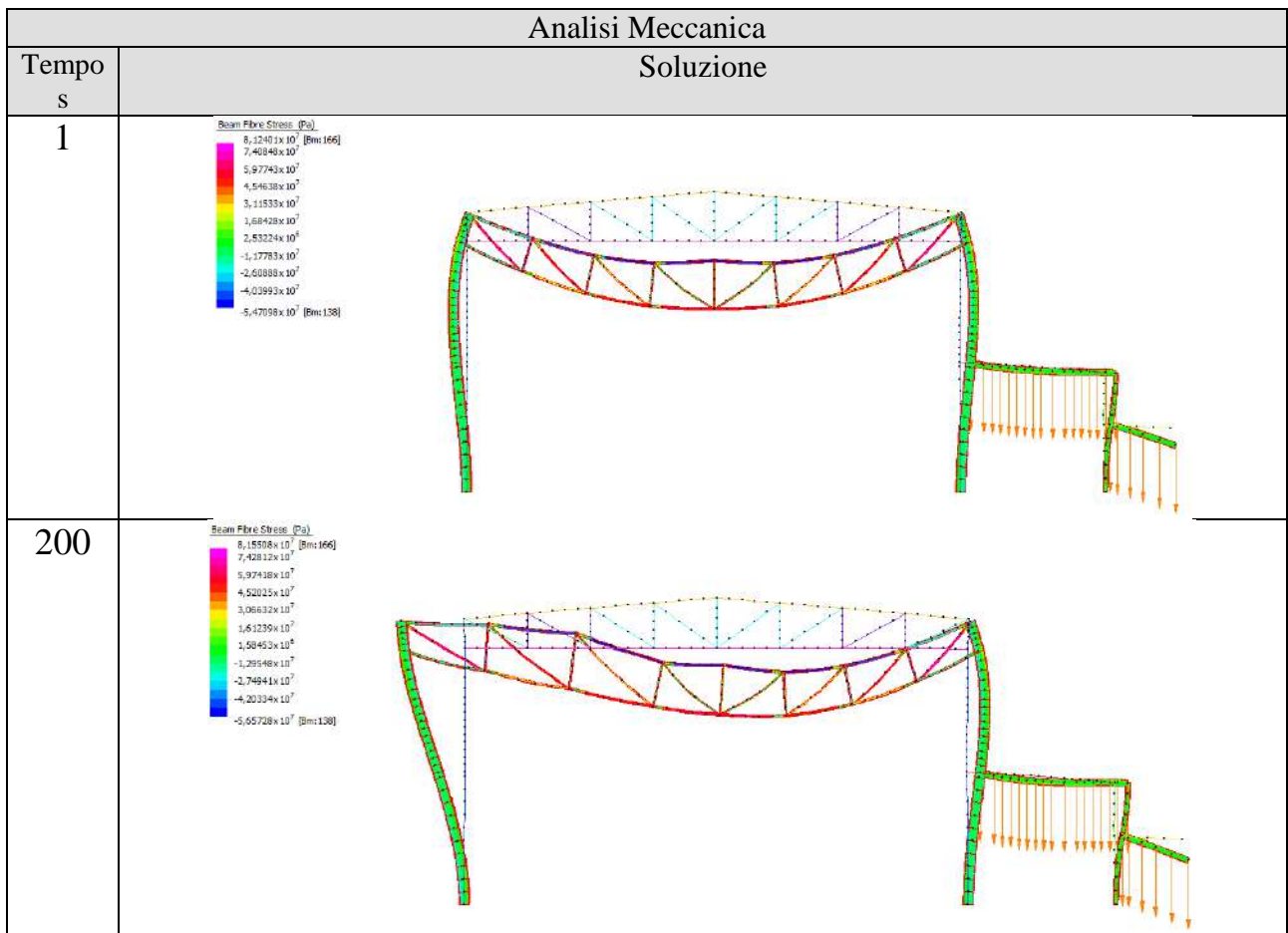
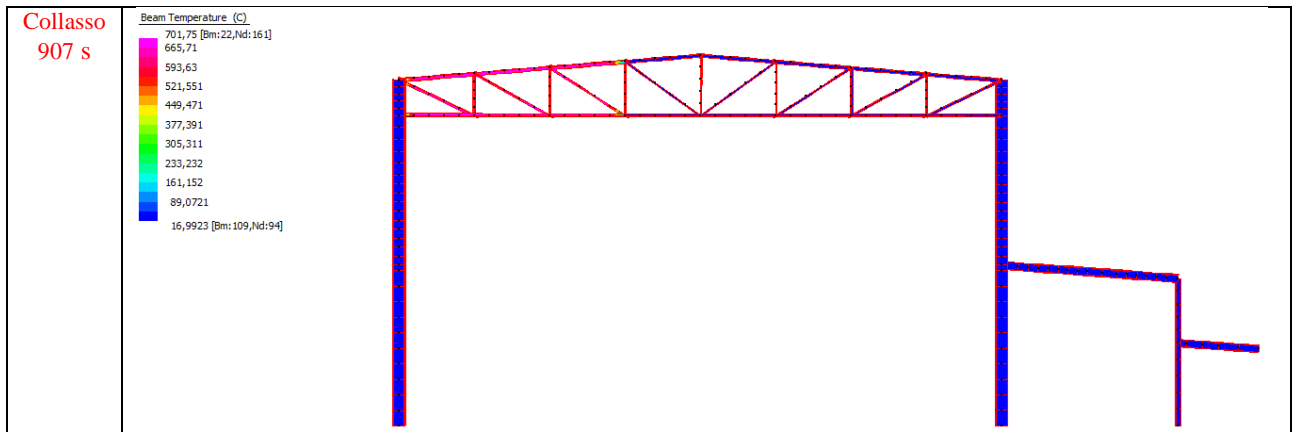
14

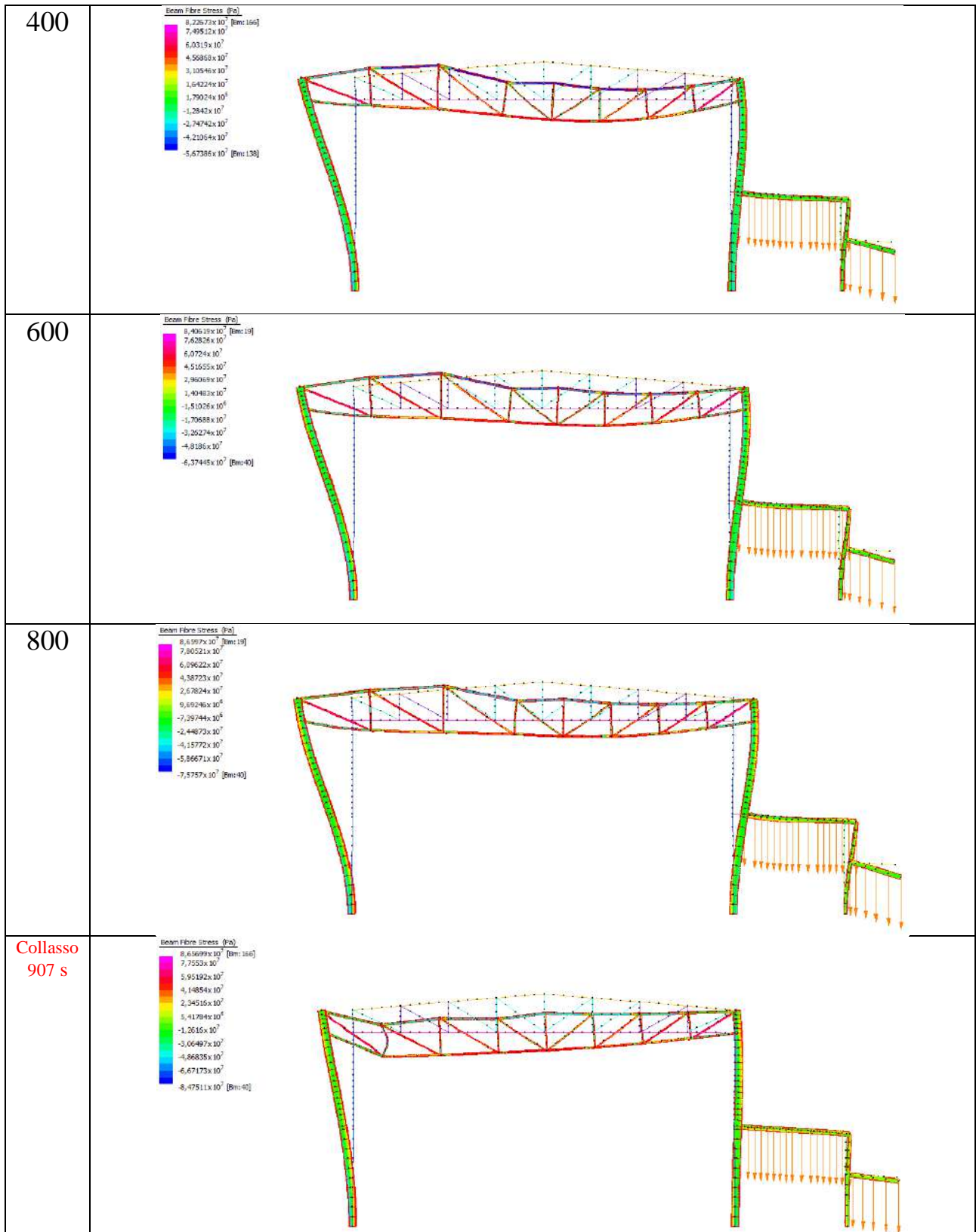


SCENARIO 7 IMPERFETTO – CAPRIATA MAGAZZINO LATO SINISTRO

Analisi termica	
Tempo	Soluzione
1	

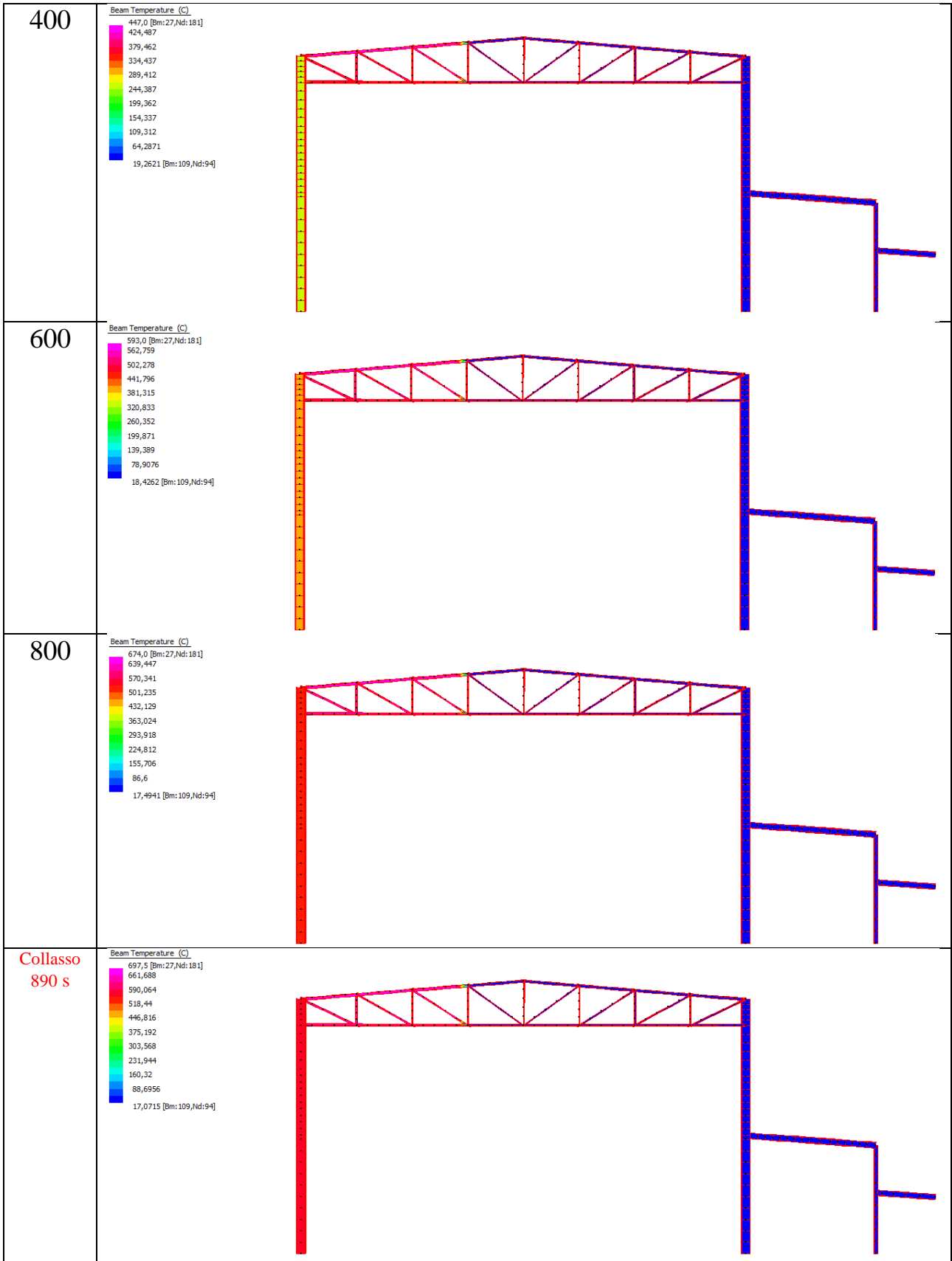






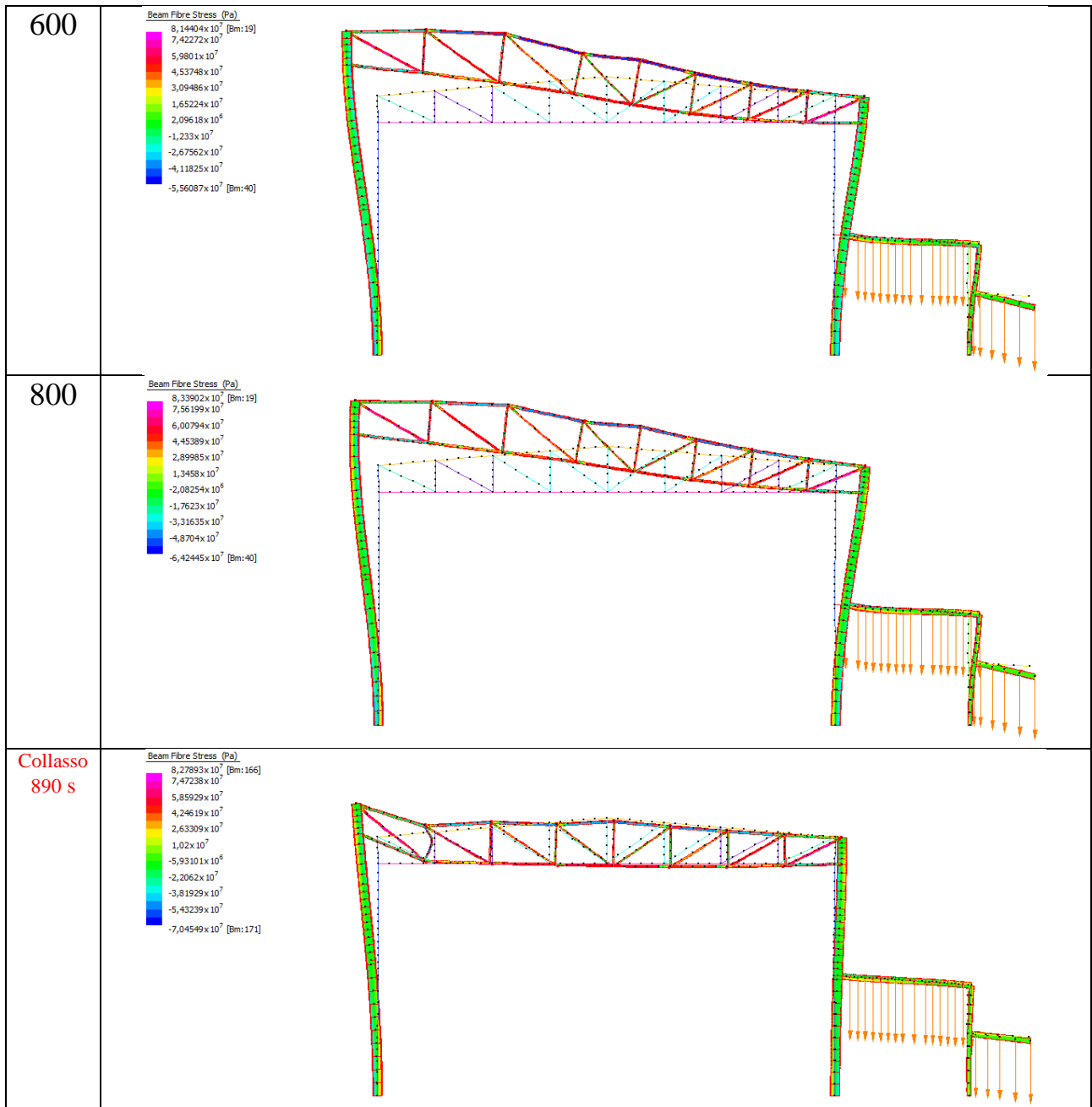
Punti di controllo scenario 7

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">nodo 1 dx magazzino</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>
<p>5</p>	<p style="text-align: center;">nodo 5 dx magazzino</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>

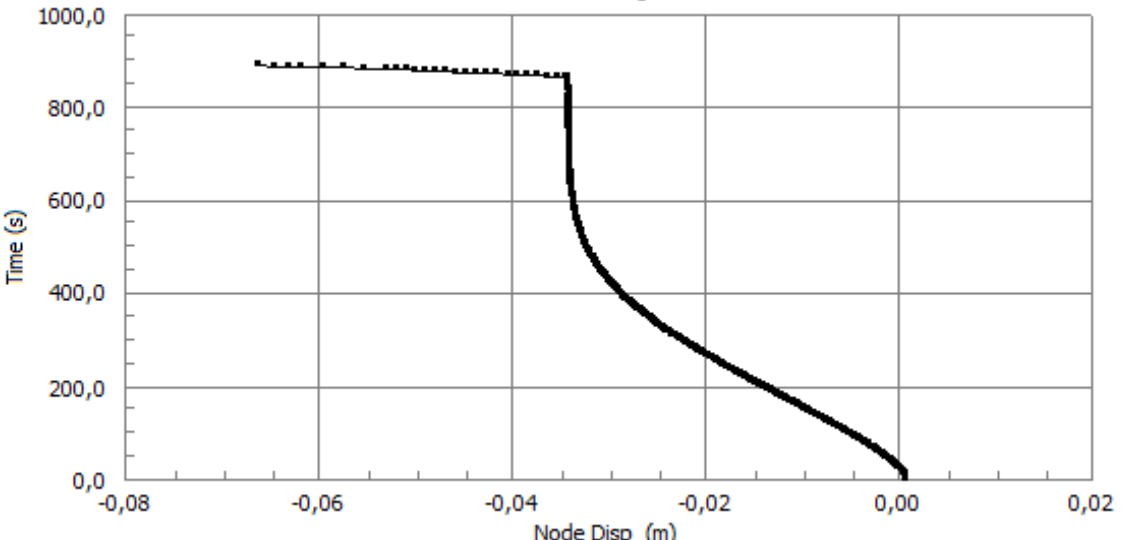
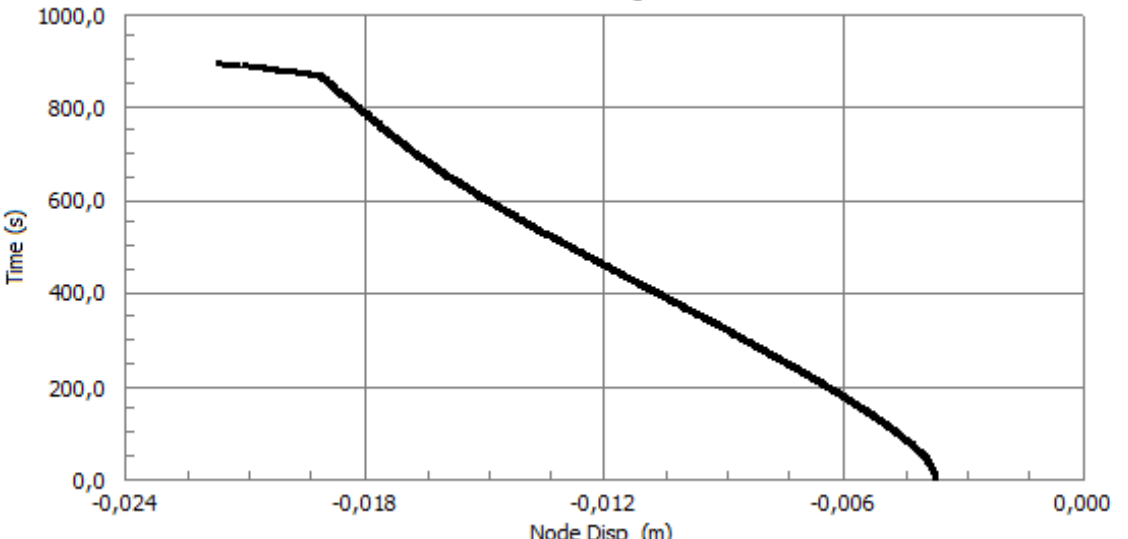


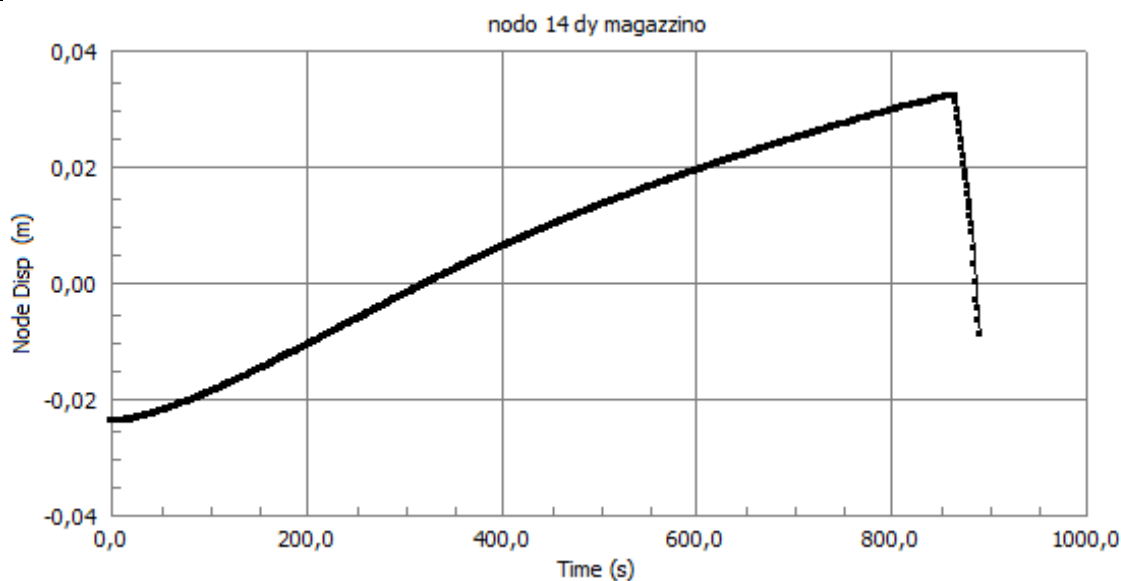
Analisi Meccanica

Tempo s	Soluzione
1	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> <p style="font-size: small;">Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p style="font-size: x-small;">8,12401 x 10⁷ [Bm:166] 7,40848 x 10⁷ 5,97743 x 10⁷ 4,54638 x 10⁷ 3,11533 x 10⁷ 1,68428 x 10⁷ 2,53224 x 10⁶ -1,17783 x 10⁷ -2,60888 x 10⁷ -4,03993 x 10⁷ -5,47098 x 10⁷ [Bm:138]</p> </div> <div style="flex: 2;"> </div> </div>
200	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> <p style="font-size: small;">Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p style="font-size: x-small;">8,09372 x 10⁷ [Bm:166] 7,37112 x 10⁷ 5,92594 x 10⁷ 4,48075 x 10⁷ 3,03556 x 10⁷ 1,59037 x 10⁷ 1,45182 x 10⁶ -1,30001 x 10⁷ -2,7452 x 10⁷ -4,19038 x 10⁷ -5,63557 x 10⁷ [Bm:138]</p> </div> <div style="flex: 2;"> </div> </div>
400	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> <p style="font-size: small;">Beam Fibre Stress (Pa)</p> <p style="font-size: x-small;">8,06203 x 10⁷ [Bm:166] 7,34185 x 10⁷ 5,90149 x 10⁷ 4,46112 x 10⁷ 3,02076 x 10⁷ 1,5804 x 10⁷ 1,40037 x 10⁶ -1,30033 x 10⁷ -2,74069 x 10⁷ -4,18105 x 10⁷ -5,62141 x 10⁷ [Bm:138]</p> </div> <div style="flex: 2;"> </div> </div>



Punti di controllo scenario 8

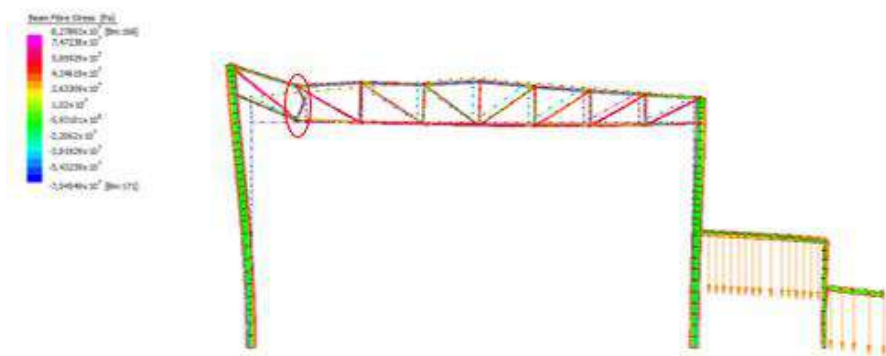
Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">nodo 1 dx magazzino</p> 
<p>5</p>	<p style="text-align: center;">nodo 5 dx magazzino</p> 

14

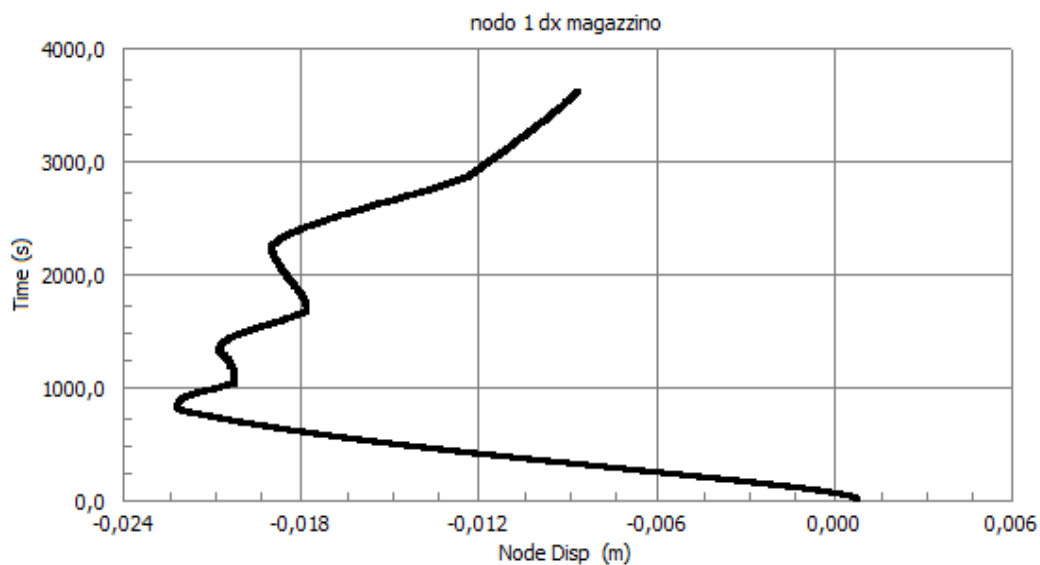
4. Considerazioni

Si nota che la struttura collasso mediamente intorno gli 850 secondi di incendio standard, ad una temperatura critica di circa 700°C . Tra tutti gli scenari si individua come critico lo scenario 8 con struttura imperfetta in quanto si notano spostamenti maggiori verso la struttura da proteggere.

Si nota come l'asta della capriata di instabilizza a causa della perdita di rigidezza dovute alla termica.



Nella scenario 4 invece è evidente l'effetto pendolo che il pilastro esterno subisce. Dopo un primo spostamento verso l'esterno ritorna verso la posizione iniziale.



6 ANALISI GLOBALE

Dopo aver studiato la sottostruttura appartenente al capannone industriale, si procede a modellare l'intera struttura.

Le prime analisi verranno svolte dapprima sulla struttura perfetta, per poi passare a quella imperfetta per analizzare eventuali condizioni sfavorevoli al collasso.

Si procede con l'inizializzazione di tutti i profili componenti la struttura all'interno del software di calcolo.

		Bill of Materials	Centre of Mass	Local Inertia	Global Inertia				
		Mass kg	Volume m ³	Length m	Area m ²	Count	Material	Type	Section
Grand total:		118284,	15,0489	3411,84					
Beam properties:									
1:	HEA550	30823,6	3,92158	184,98		512		Beam	I-Section
2:	IPE360	2709,46	0,344715	47,4161		216		Beam	I-Section
3:	HEA260	2687,37	0,341905	39,39		140		Beam	I-Section
4:	IPE330	1069,05	0,136012	21,7272		126		Beam	I-Section
6:	HEA220	4283,75	0,545007	84,76		200		Beam	I-Section
7:	ILS300	17038,4	2,16774	466,18		1100		Beam	I-Section
9:	L60X6	2179,45	0,277284	401,28		440		Beam	Angle
10:	TONDO PHI10	169,017	0,021531	274,277		810		Beam	Solid Round
11:	L 100X10	1332,23	0,169495	44,6039		120		Beam	Angle Mirrored Left
12:	L 150X12	8778,37	1,11684	161,58		480		Beam	Angle Mirrored Left
13:	L90X9	2284,33	0,290627	94,4207		360		Beam	Angle Mirrored Left
14:	L 130X12	7533,89	0,95851	161,04		480		Beam	Angle Mirrored Left
15:	L80X8	2729,57	0,347273	142,793		420		Beam	Angle Mirrored Left
16:	HAE200	919,738	0,117015	21,75		50		Beam	I-Section
17:	IPE450	6436,97	0,818953	82,89		222		Beam	I-Section
18:	L70X7	2916,2	0,371017	199,257		390		Beam	Angle Mirrored Left
20:	IPE200	2203,14	0,280298	98,35		170		Beam	I-Section
23:	UNP 180	5249,68	0,667898	238,535		560		Beam	C-Channel
24:	HEA 180	9858,53	1,25427	276,88		400		Beam	I-Section
25:	IPE270	3669,5	0,466858	101,712		240		Beam	I-Section
26:	DOPPIO ILS300	2970,95	0,377984	42,38		100		Beam	I-Section Mirrored Right
28:	TONDO PHI16	288,355	0,036733	182,752		220		Beam	Solid Round
29:	TONDO PHI24	152,162	0,019384	42,8844		40		Beam	Solid Round
Total		118284,	15,0489	3411,84		7796			

Figura 6.1-Elementi costituenti la struttura

S'impostano le diverse Table:

- Calore specifico;
- Conducibilità termica;
- Espansione termica;
- K_E ;
- K_y ;
- Sforzo-deformazione S_{275} ;
- Curve di riscaldamento termico per i diversi profili (calcolate in precedenza).

Tables		Table Names
Type	Count	
Factor vs Temperature	7	1: C
Factor vs Time	26	2: HEA180
Factor vs Frequency/...	0	3: HEA200
Factor vs Position	0	4: HEA220
Acceleration vs Time	0	5: HEA260
Strain vs Time	0	6: HEA550
Stress vs Strain	1	7: ILS300
Force vs Displacement	0	8: ILS300
Force vs Velocity	0	9: IPE200
Moment vs Curvature	0	10: IPE200
Moment vs Rotation	0	11: IPE220
		12: IPE270
		13: IPE330
		14: IPE360
		15: IPE450
		16: L60x6
		17: L70x7
		18: L80x10
		19: L90x10

Figura 6.2-Sommario tabelle eseguite su straus7

Create le Table, si assegnano ai diversi profili, per poi discretizzare la struttura.

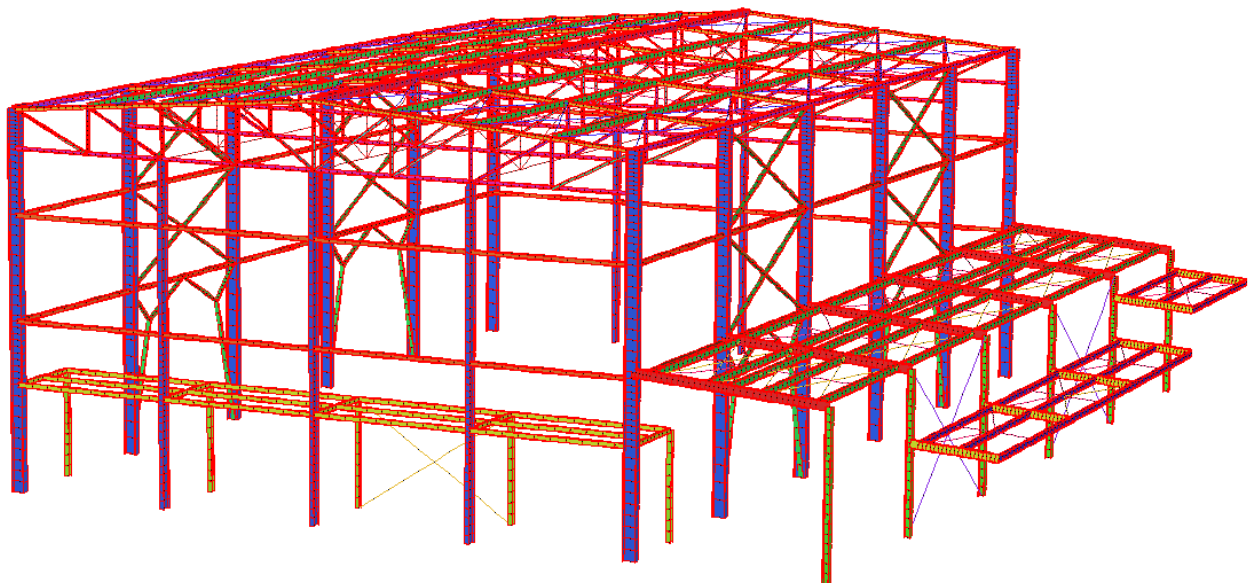


Figura 6.3-Discretizzazione struttura

Si applicano le diverse Boundary conditions, tra cui i vincoli e i carichi, sia statici che termici.

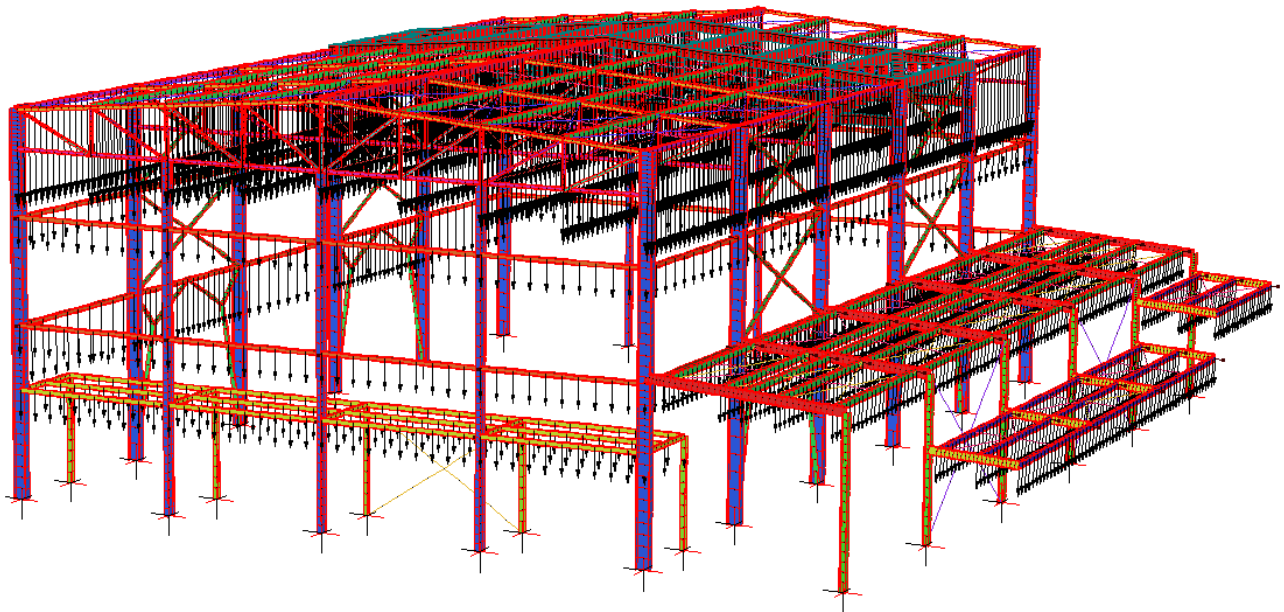


Figura 6.4-Applicazione delle condizioni al contorno

Le condizioni di carico statico sono state individuate dalla relazione di calcolo a freddo.

Carico distribuito con riferimento globale X									
Descrizione	Cod.	Cond. carico	Tipo Azione/categoria	Val. iniz.	Dist. iniz. nodo I	Val. finale	Dist.fin. nodo I	Aliq.inerz.	Aliq.inerz. SLD
vento X	3	Condizione 3	Variable: Vento	0.007500	0.000	0.007500	0.000	0.0000	0.0000
Vento X 4 m	8	Condizione 3	Variable: Vento	0.005700	0.000	0.005700	0.000	0.0000	0.0000

Carico distribuito con riferimento globale Y									
Descrizione	Cod.	Cond. carico	Tipo Azione/categoria	Val. iniz.	Dist. iniz. nodo I	Val. finale	Dist.fin. nodo I	Aliq.inerz.	Aliq.inerz. SLD
vento Y	4	Condizione 4	Variable: Vento	0.007500	0.000	0.007500	0.000	0.0000	0.0000
Vento Y 4 m	9	Condizione 4	Variable: Vento	0.005700	0.000	0.005700	0.000	0.0000	0.0000

Carico distribuito con riferimento globale Z									
Descrizione	Cod.	Cond. carico	Tipo Azione/categoria	Val. iniz.	Dist. iniz. nodo I	Val. finale	Dist.fin. nodo I	Aliq.inerz.	Aliq.inerz. SLD
peso copertura+fotovoltaic o	1	Condizione 1	Permanente: Permanente portato	-0.005000	0.000	-0.005000	0.000	1.0000	1.0000
neve	2	Condizione 2	Variable: Neve	-0.012000	0.000	-0.012000	0.000	0.3300	0.3300
peso pannello sandwich	5	Condizione 1	Permanente: Permanente portato	-0.001500	0.000	-0.001500	0.000	1.0000	1.0000
neve accumulo 250	6	Condizione 2	Variable: Neve	-0.025000	0.000	-0.025000	0.000	0.3300	0.3300
neve accumulo 210	7	Condizione 2	Variable: Neve	-0.021000	0.000	-0.021000	0.000	0.3300	0.3300
neve accumulo 150	10	Condizione 5	Variable: Neve	-0.016000	0.000	-0.016000	0.000	0.3300	0.3300
pannello lana sp. 180	11	Condizione 1	Permanente: Permanente portato	-0.003000	0.000	-0.003000	0.000	1.0000	1.0000

Figura 6.5-Carichi applicati alla struttura a "freddo"

Dai seguenti carichi, s'individua la combinazione di carico eccezionale.

$$F_{fi,d} = \gamma_{GA} G_K + \gamma_p P_K(t) + \Psi_{2,1} Q_{K,1} + \sum_i \Psi_{2,i} Q_{K,i} + \sum_i A_d(t)$$

Dove:

- G_k è il valore caratteristico delle azioni permanenti;
- P_k è il valore caratteristico dell'azione di precompressione;
- $Q_{k,1}$ è il valore caratteristico dell'azione variabile principale;
- $\Psi_{2,1}$ è il coefficiente di combinazione per il valore frequente dell'azione variabile principale;
- $Q_{k,i}$ è il valore caratteristico delle altre azioni variabili;
- A_d è il valore di progetto dell'azione termica indiretta dovuta all'incendio.

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Visti i valori dei coefficienti di combinazione, si esclude dalla combinazione di carico sia il vento che la neve (azioni variabili), mentre si applica il peso proprio, i carichi permanenti (uniformemente distribuiti) e i carichi termici ai nodi.

Secondo le NTC08 punto 3.6.1.5.3 “Non si prende in considerazione la possibilità di concomitanza dell'incendio con altre azioni eccezionali e con le azioni sismiche”.

7 SCENARI DI INCENDIO

Il punto di partenza per la valutazione della sicurezza in caso di incendio di una costruzione è la definizione degli incendi naturali di progetto, la cui quantificazione analitica è basata sulla valutazione degli scenari d'incendio di progetto. Gli scenari d'incendio rappresentano la schematizzazione degli eventi che possono

ragionevolmente verificarsi nell'edificio. E' chiaro che nell'ambito dell'applicazione dell'approccio ingegneristico, ai fini della valutazione della sicurezza strutturale, devono essere analizzati gli incendi realisticamente ipotizzabili, scegliendo i più gravosi per la sollecitazione strutturale.

Per “scenario di incendio” deve intendersi *“la descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi. Di solito può comprendere le seguenti fasi: innesco, crescita, incendio pienamente sviluppato, decadimento. Deve, inoltre, definire l'ambiente nel quale si sviluppa l'incendio di progetto ed i sistemi che possono avere impatto sulla sua evoluzione, come ad esempio eventuali impianti di protezione attiva”*.

Gli scenari d'incendio rappresentano, dunque, la schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi. Nel processo d'individuazione di questo dato di progetto nell'ambito della progettazione strutturale, devono essere valutati tutti gli incendi realisticamente ipotizzabili, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio e la conseguente sollecitazione strutturale. A partire da queste premesse, appare chiaro che la corretta individuazione degli scenari d'incendio costituisce la fase centrale nell'ambito del processo di progettazione prestazionale e, pertanto, è quanto mai opportuno che la loro definizione sia condivisa, in fase preventiva, da parte dell'organo di controllo. Lo scenario d' incendio è sensibilmente influenzato, tra l'altro, dalla geometria dei locali che costituiscono il compartimento e dalle loro condizioni di ventilazione naturale.

Nel nostro caso, si tiene conto delle analisi preliminari precedentemente svolte sulla sottostruttura, sia perfetta che imperfetta, nonché della globalità della struttura e dei punti di stoccaggio del materiale, in modo da individuare gli scenari peggiori che possano portare ad un collasso di tipo non implosivo e prematuro della struttura.

Prima di procedere con l'analisi degli incendi naturali di progetto, si esamina la struttura soggetta a curve di riscaldamento, derivanti dalla ISO834. In questo modo, si potranno eseguire, al fine della tesi, delle considerazioni su quanto conservativa possa essere la curva ISO834.

Si scelgono 5 scenari d'incendio tra cui anche quello generalizzato.

Si individuano, tra i sette scenari di incendio localizzato, derivanti dall'analisi della sottostruttura, i quattro più gravosi.

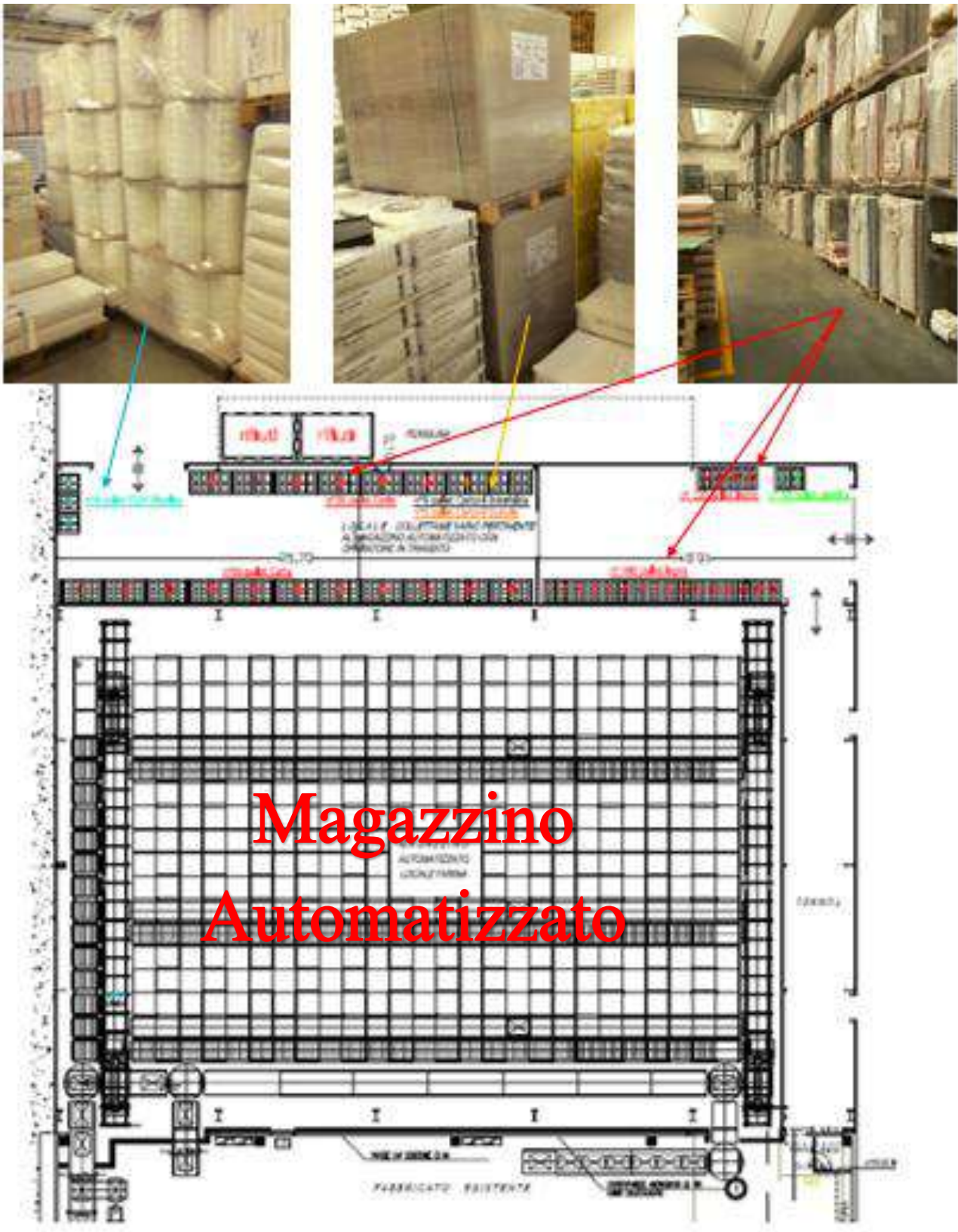
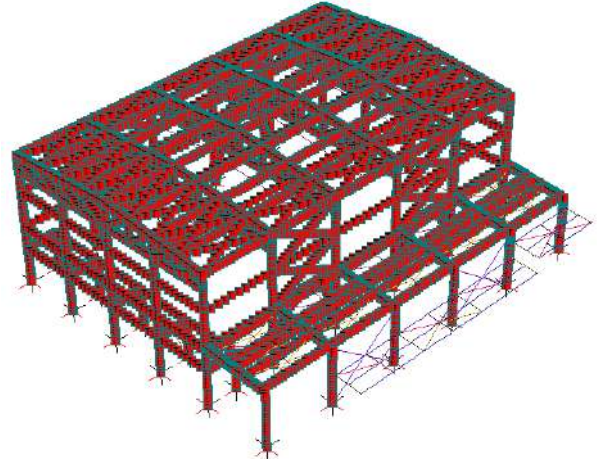
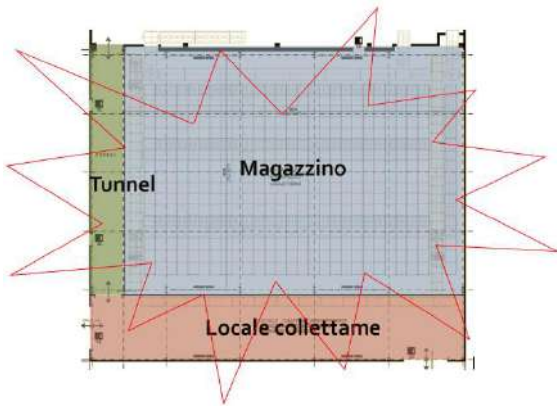


Figura 7.1-Materiali stoccati

SCENARI DI INCENDIO

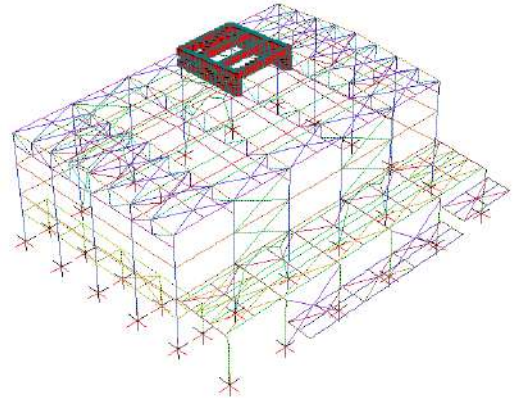
G
e
n
e
r
a
l
i
z
z
a
t
o



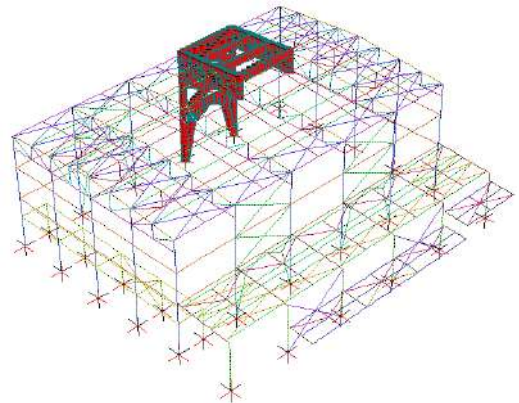
S
c
e
n
a
r
i
o
1

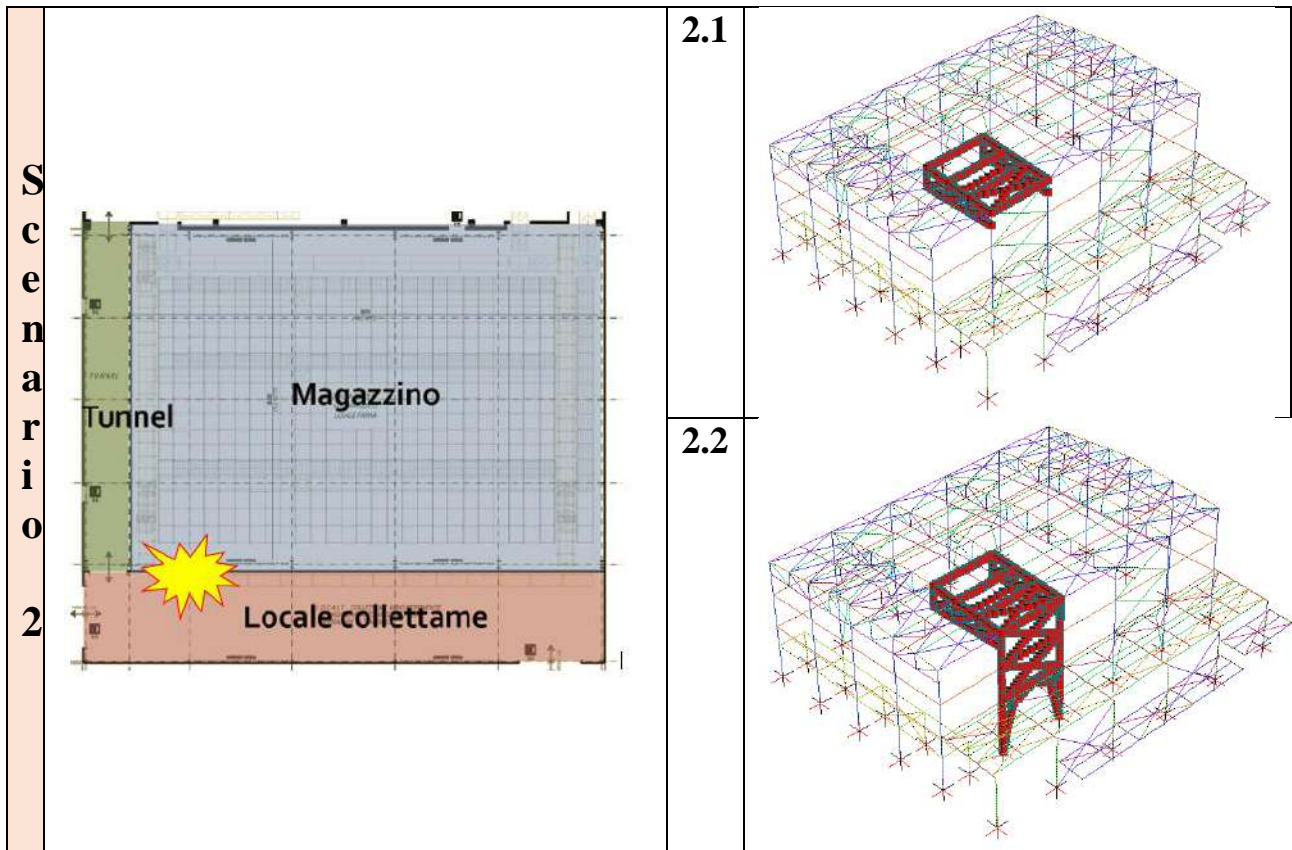


1.1



1.2





Si segue lo schema proposto degli Eurocodici.

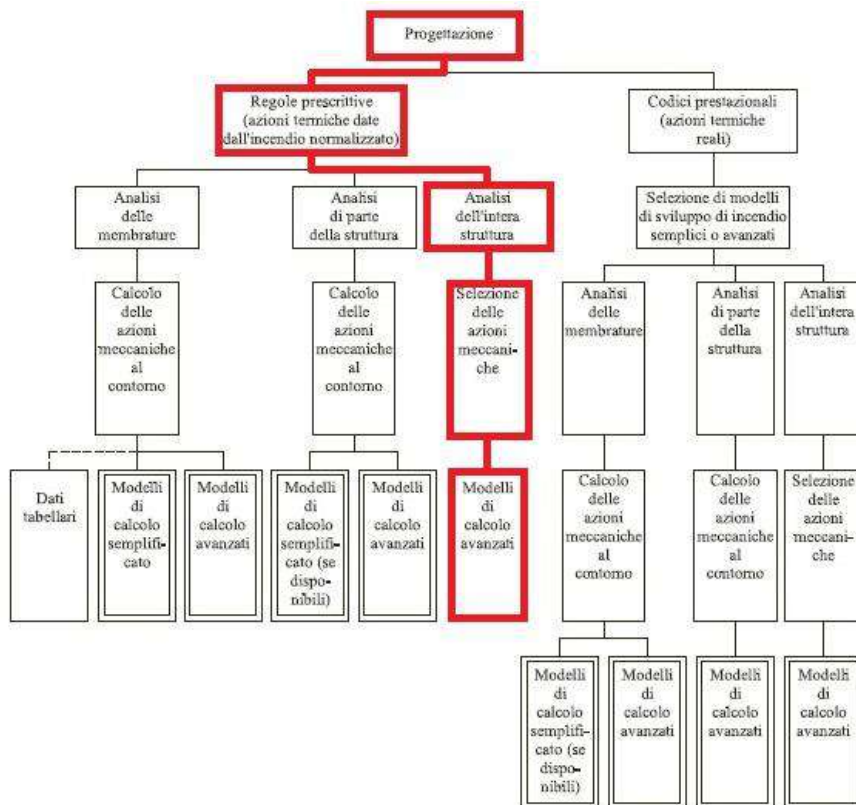


Figura 7.1-Percorso progettuale

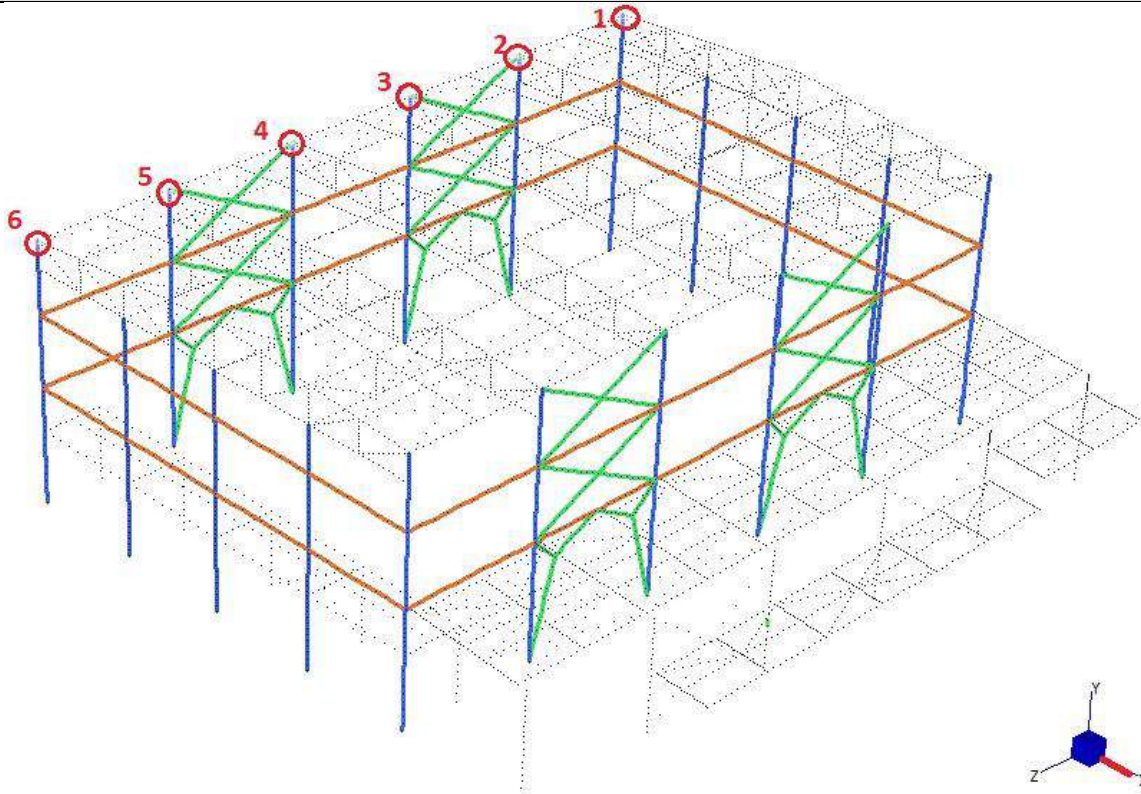
8 STRUTTURA PERFETTA

Come nel caso della sottostruttura, si procede con l'analisi transiente termica non lineare per un periodo pari a 1800s, congruo con quello imposto dalla normativa (**R30**) per il quale la struttura deve possedere un'opportuna capacità portante.

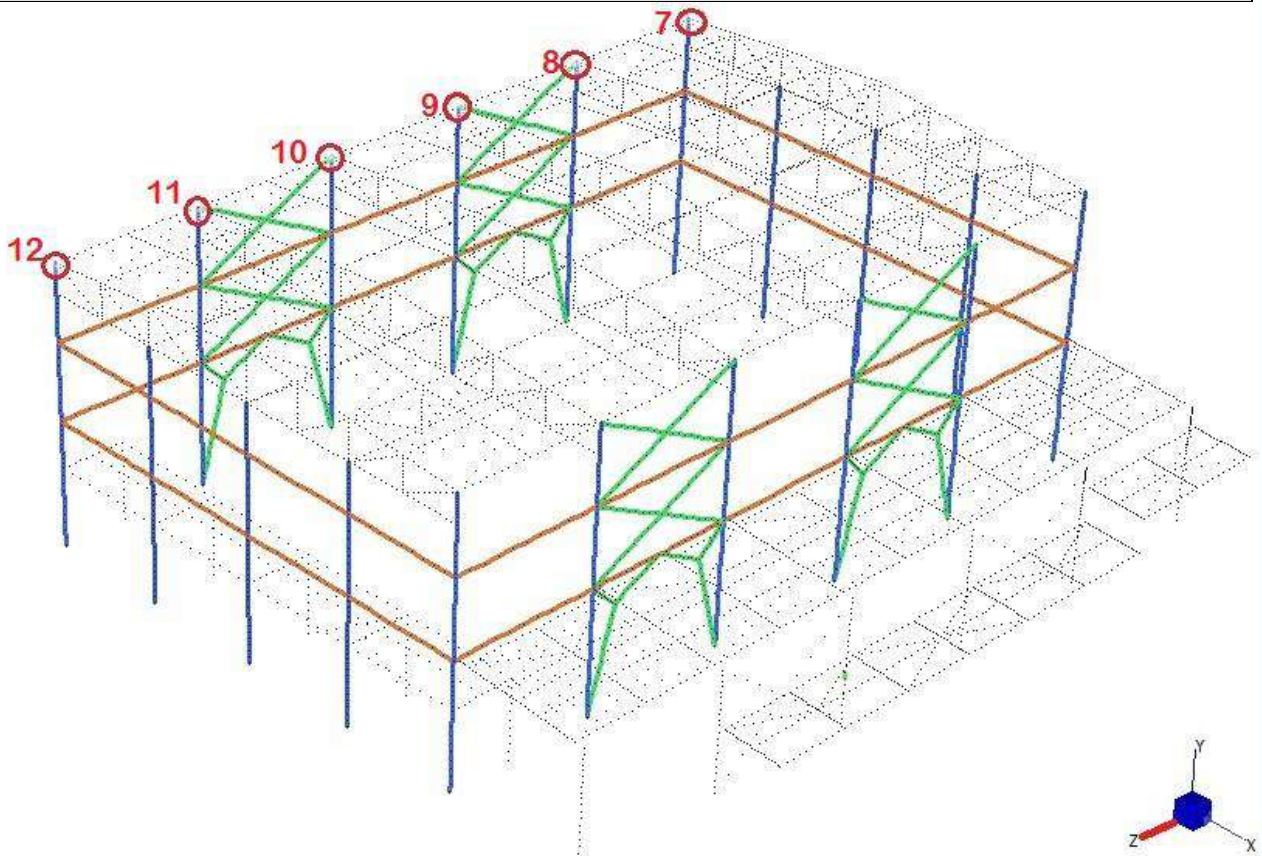
Durante le analisi, si tracciano i grafici di alcuni nodi di riferimento per poter confrontare, successivamente, le soluzioni

Nodi di riferimento

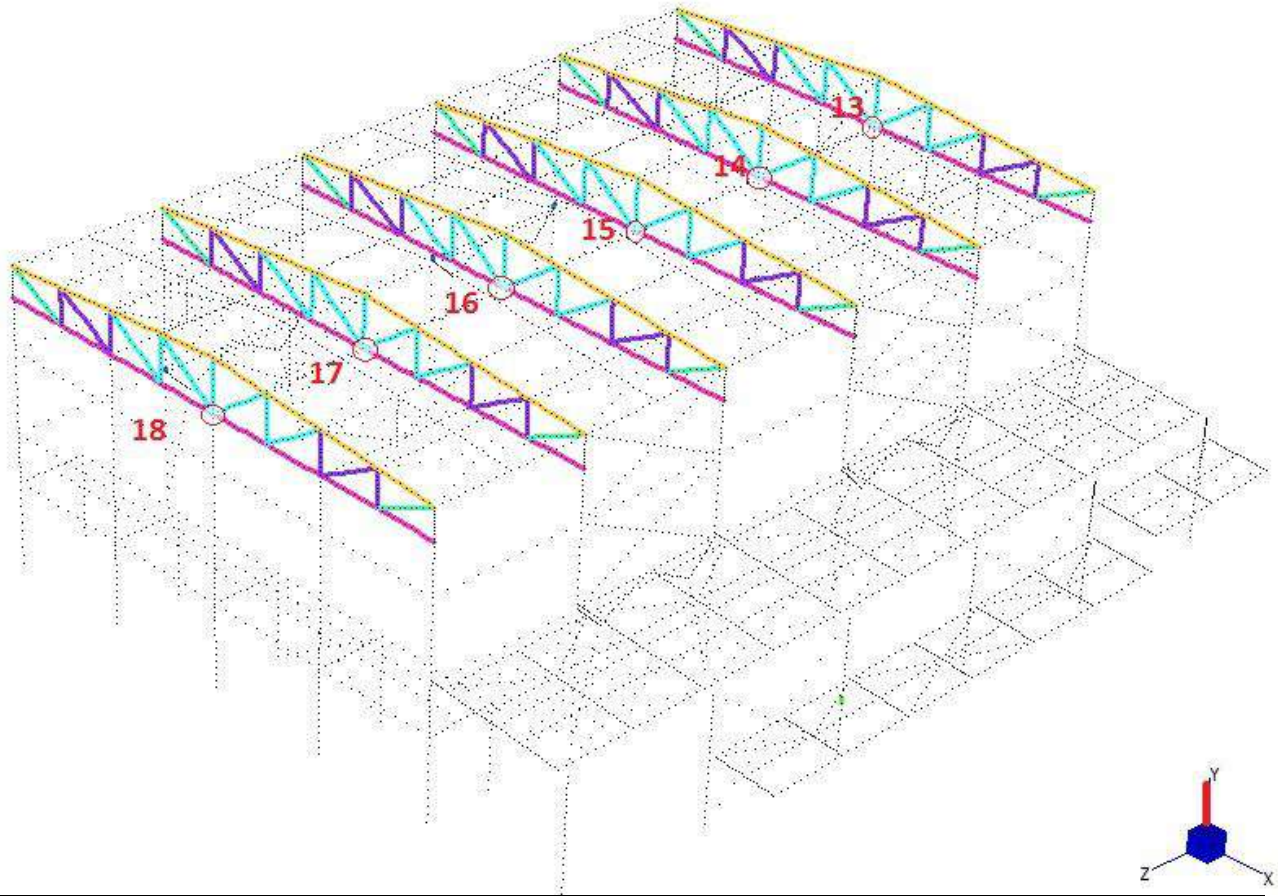
ASSE X



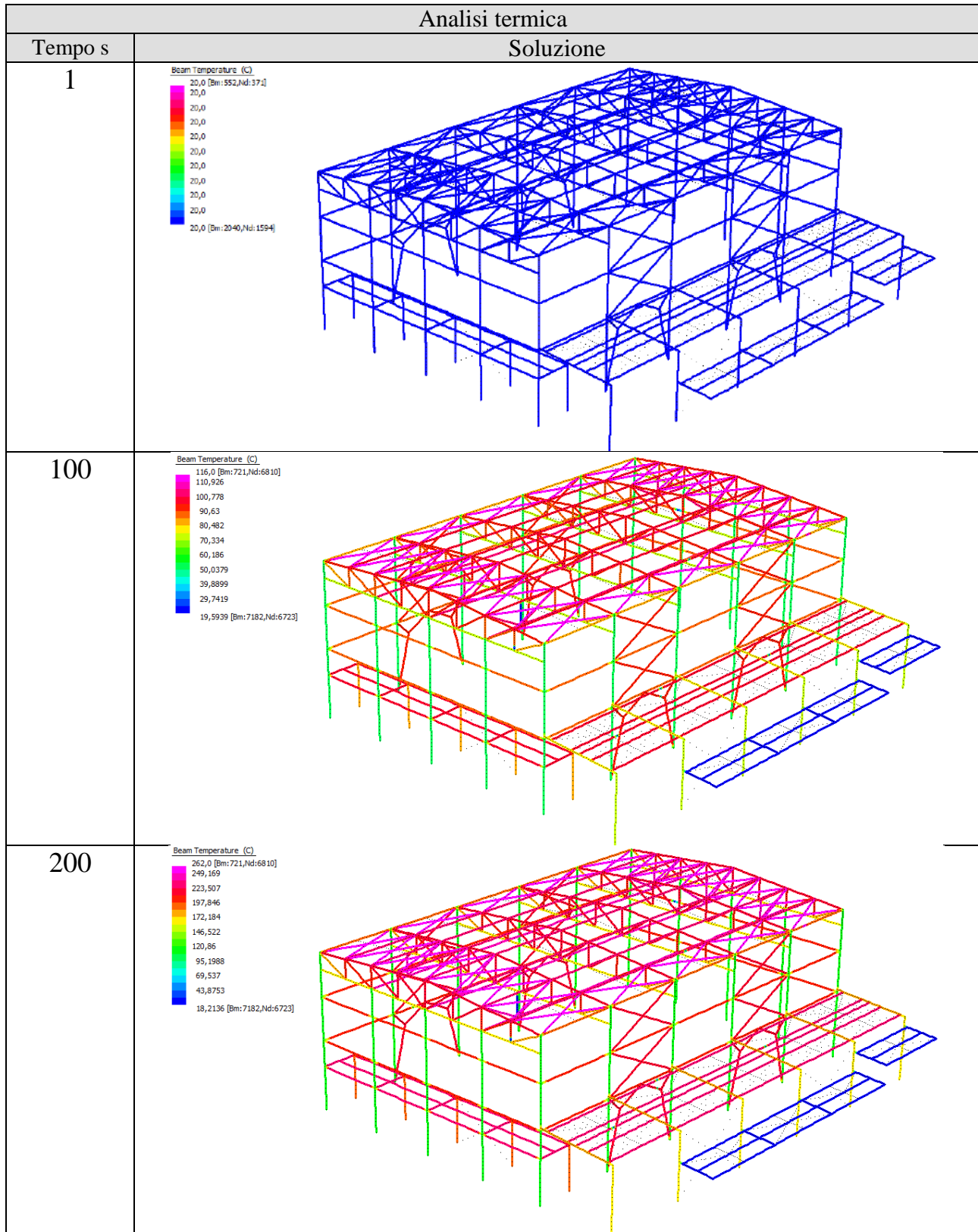
ASSE Z



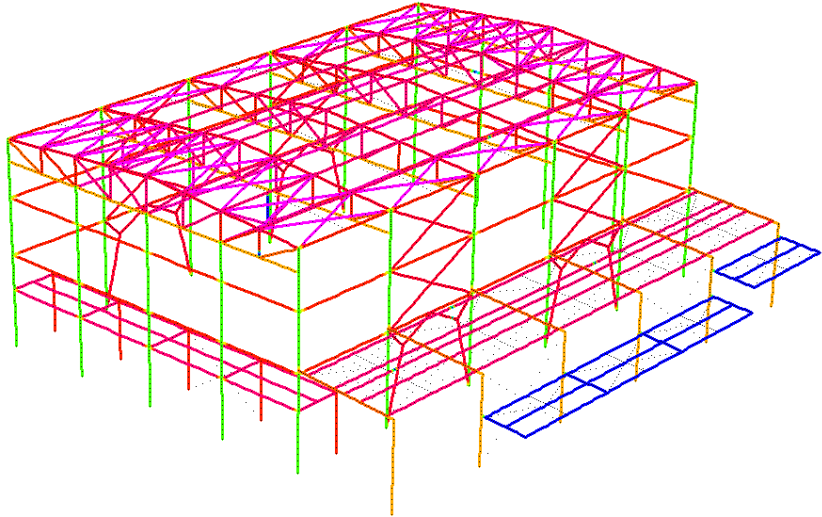
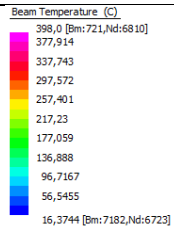
ASSE Y



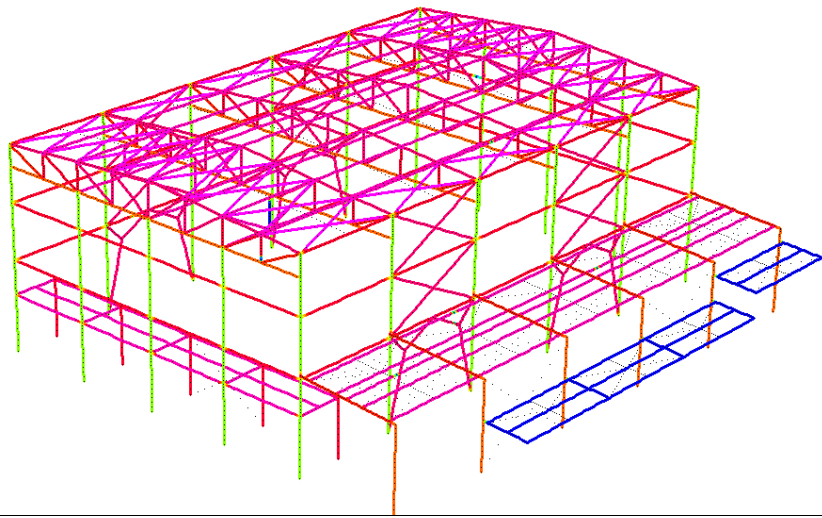
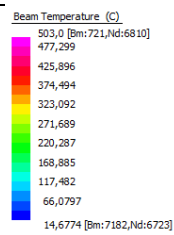
INCENDIO GENERALIZZATO



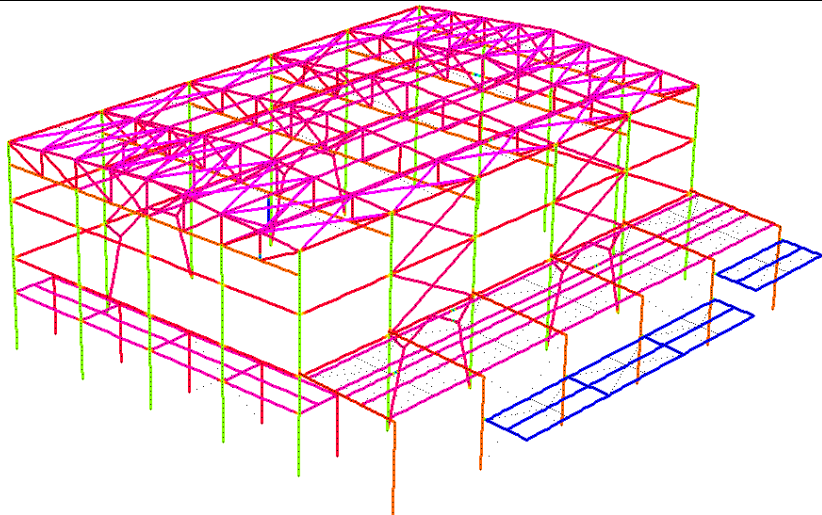
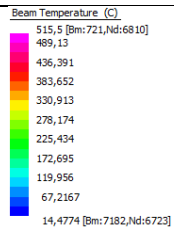
300



400



414

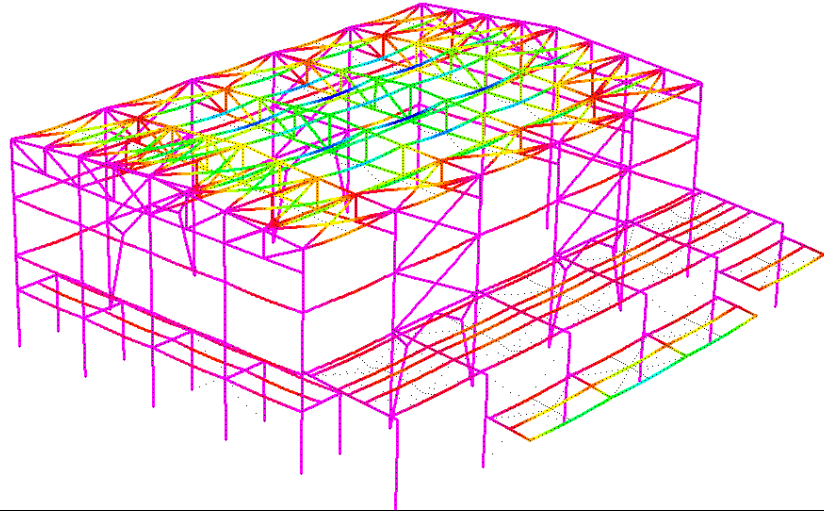
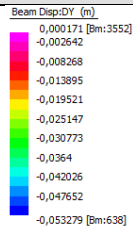


Analisi Meccanica

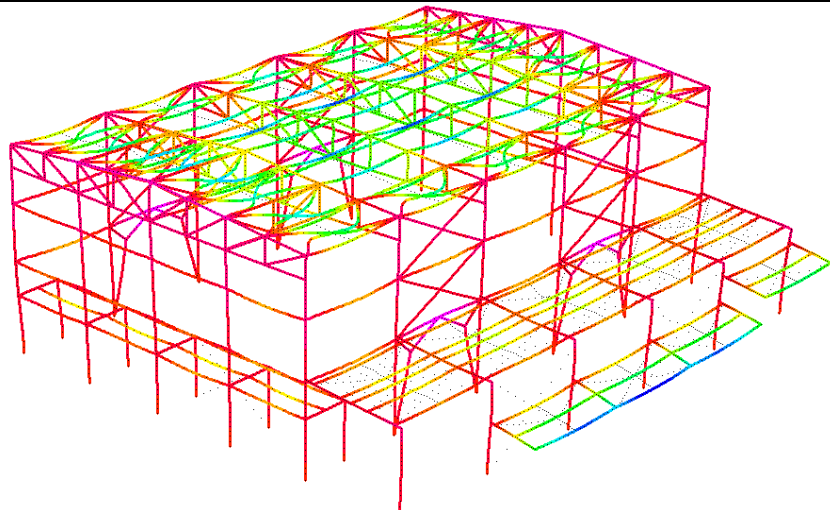
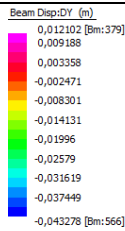
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

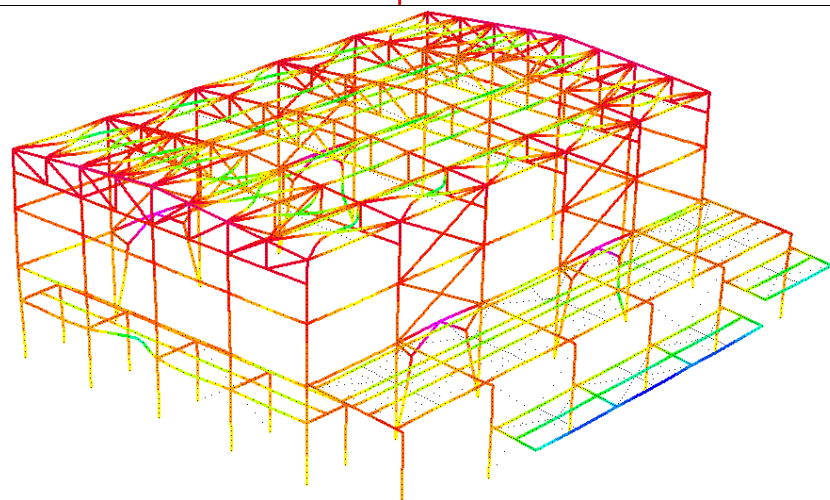
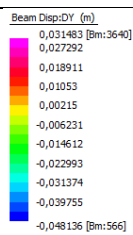
1



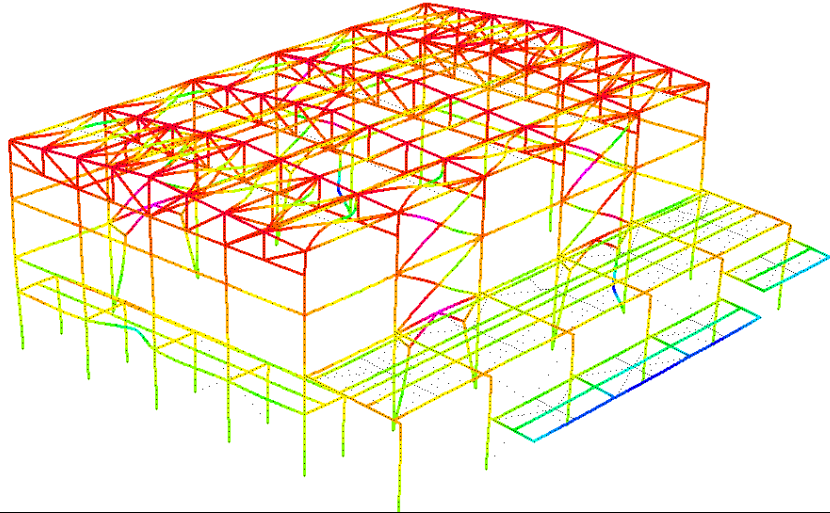
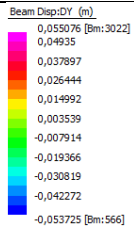
100



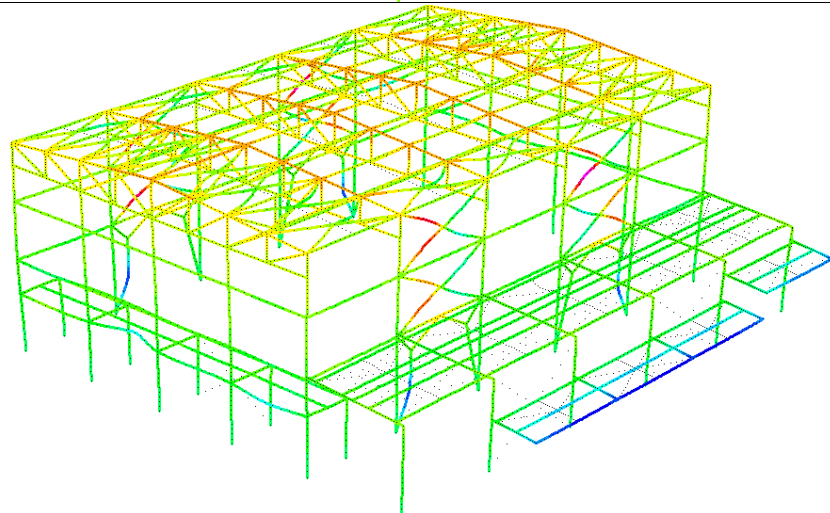
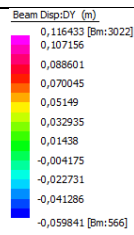
200



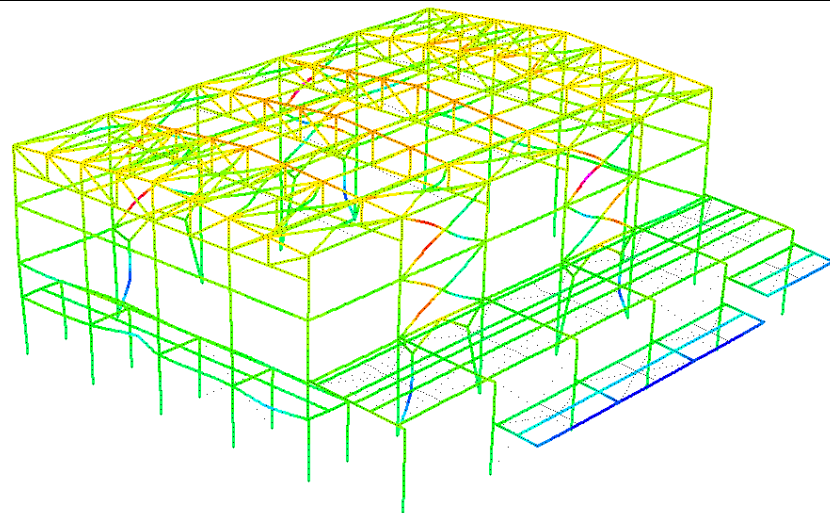
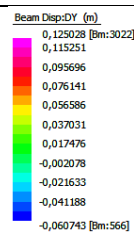
300



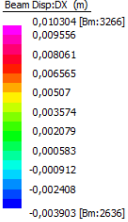
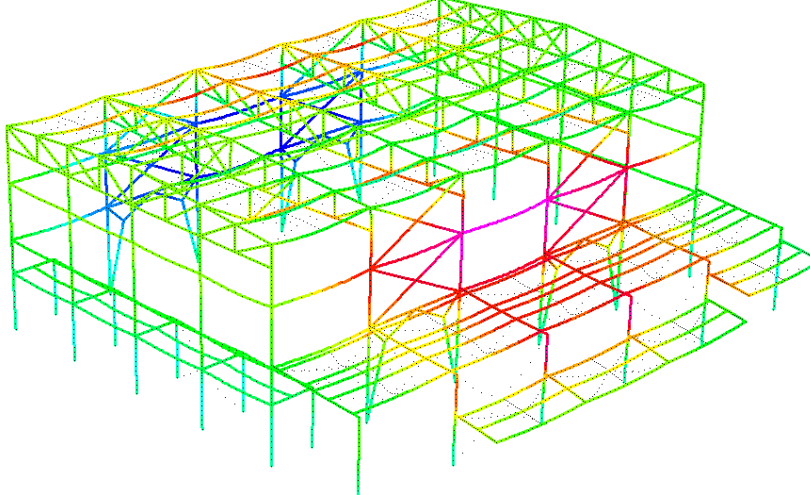
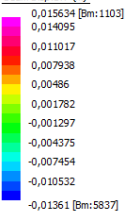
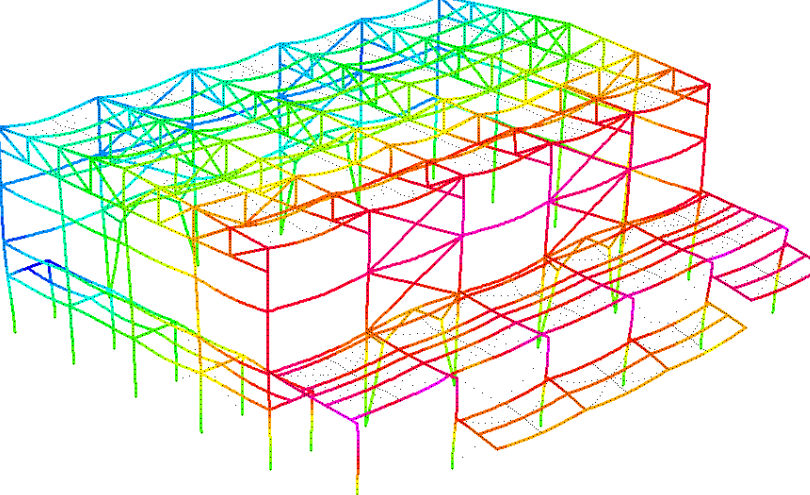
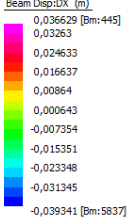
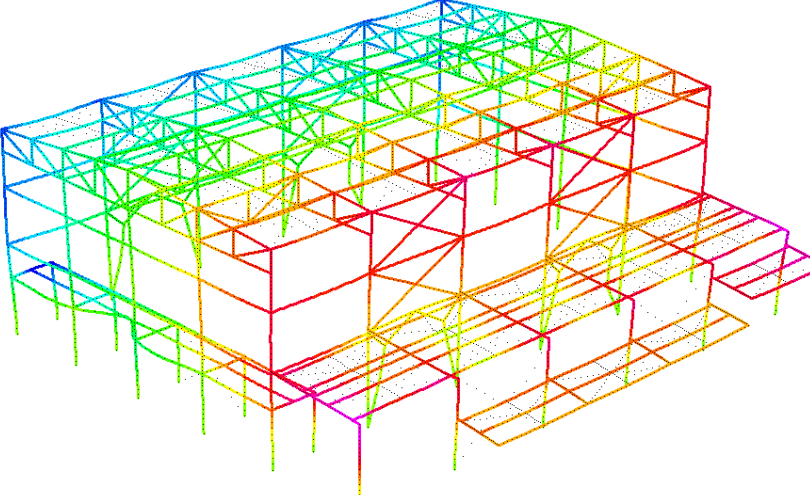
400



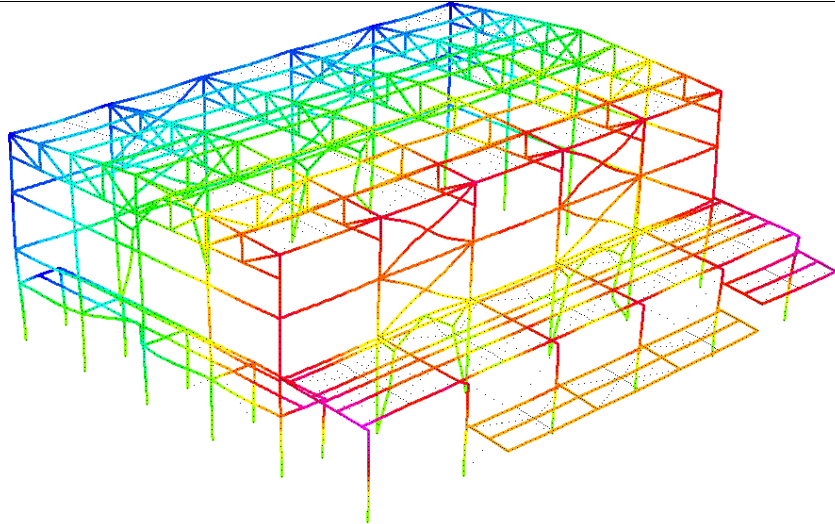
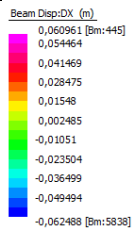
414



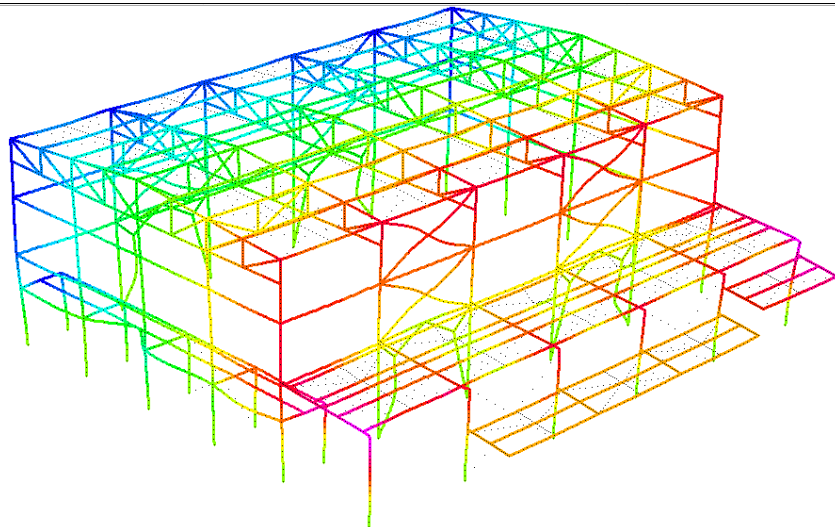
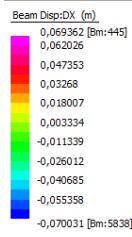
Analisi Meccanica

Analisi Meccanica	
Tempo s	Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X
1	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p style="font-size: small;">Beam Disp:DX (m)</p>  <p style="font-size: x-small;">0,010304 [Bm:3266] 0,009556 0,008061 0,006565 0,00507 0,003574 0,002079 0,000583 -0,000912 -0,002408 -0,003903 [Bm:2636]</p> </div> <div style="flex-grow: 1;">  </div> </div>
100	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p style="font-size: small;">Beam Disp:DX (m)</p>  <p style="font-size: x-small;">0,015634 [Bm:1103] 0,014095 0,011017 0,007938 0,00486 0,001782 -0,001297 -0,004375 -0,007454 -0,010532 -0,01361 [Bm:5837]</p> </div> <div style="flex-grow: 1;">  </div> </div>
200	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p style="font-size: small;">Beam Disp:DX (m)</p>  <p style="font-size: x-small;">0,036629 [Bm:445] 0,03263 0,024633 0,016637 0,00864 0,000643 -0,007354 -0,015351 -0,023348 -0,031345 -0,039341 [Bm:5837]</p> </div> <div style="flex-grow: 1;">  </div> </div>

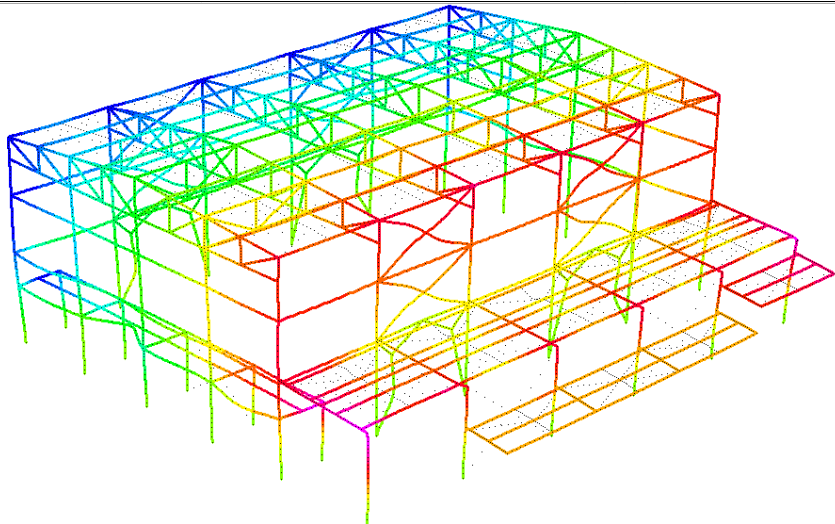
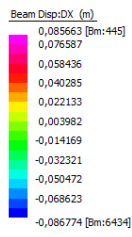
300



400



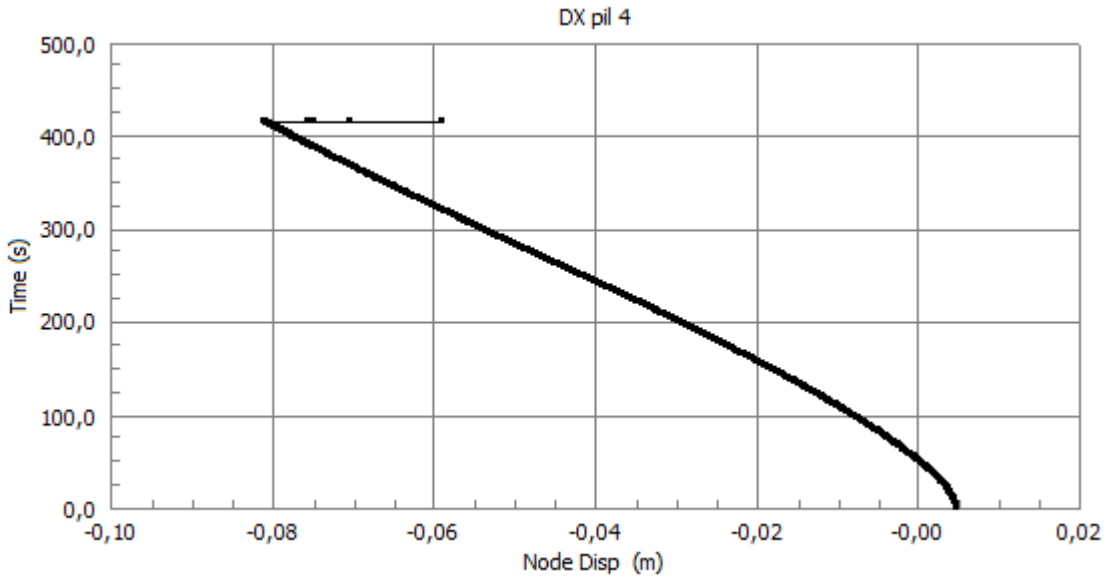
414



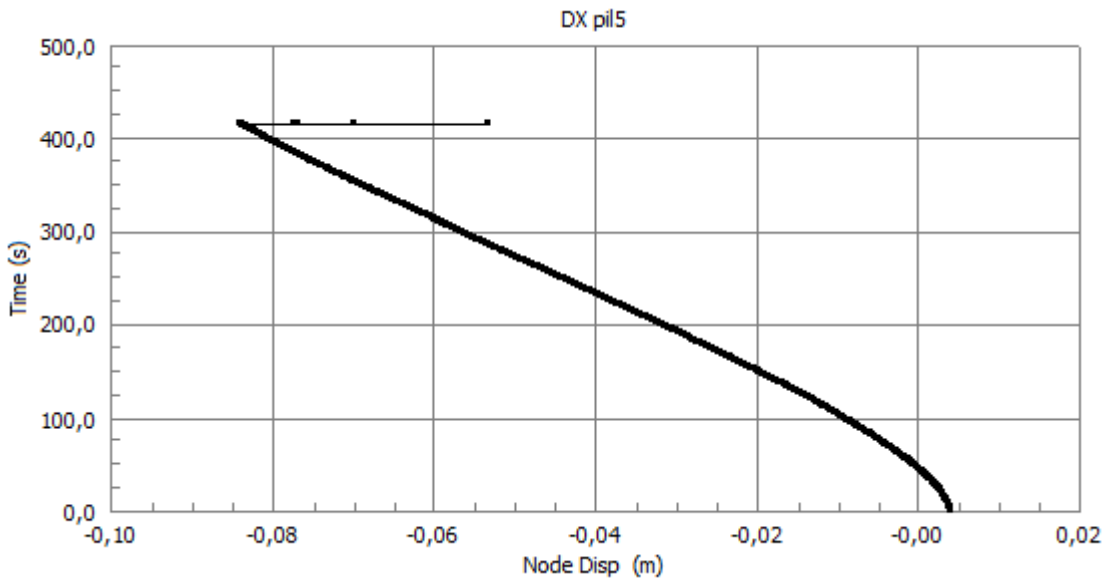
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>

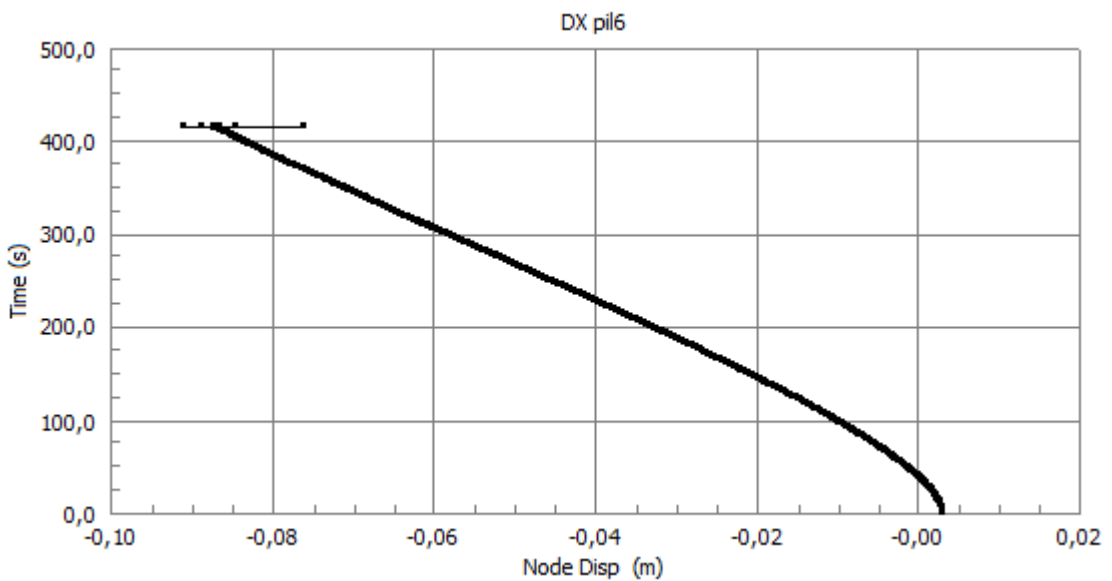
4



5



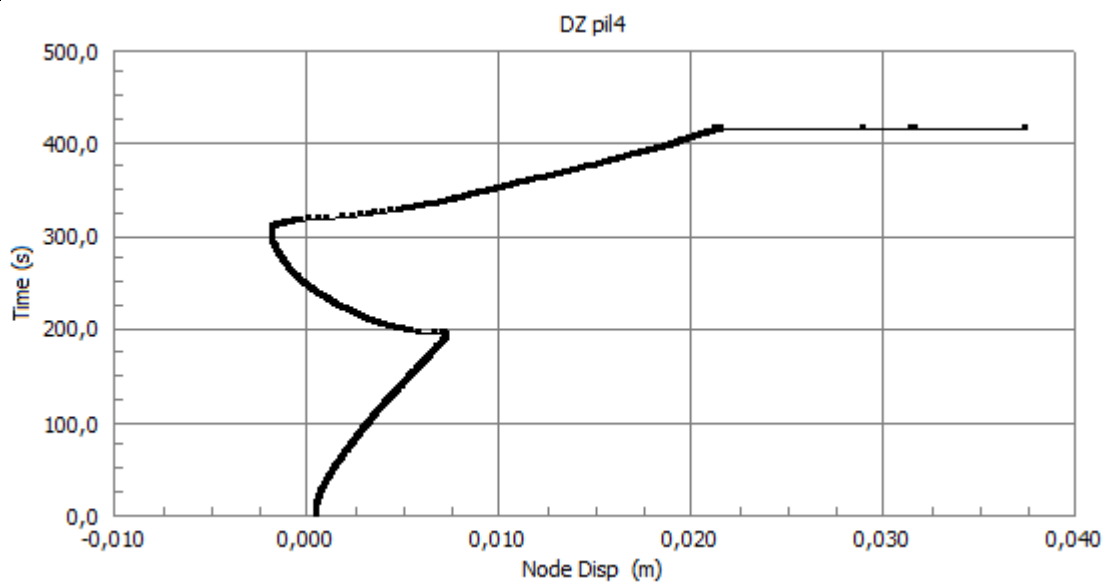
6



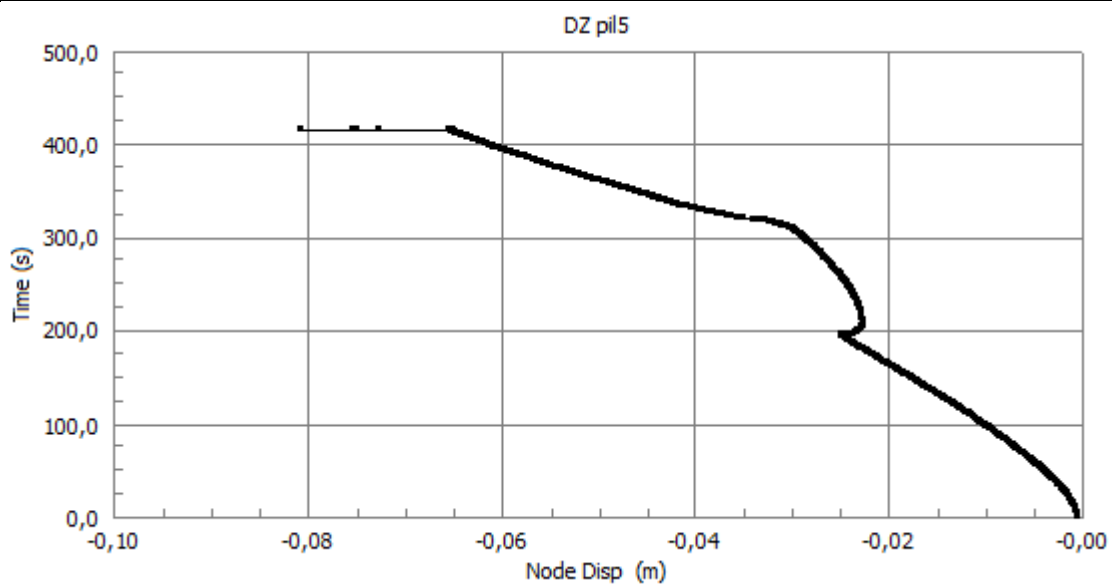
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
<p>7</p>	<p>DZ pil1</p>
<p>8</p>	<p>DZ pil2</p>
<p>9</p>	<p>DZ pil3</p>

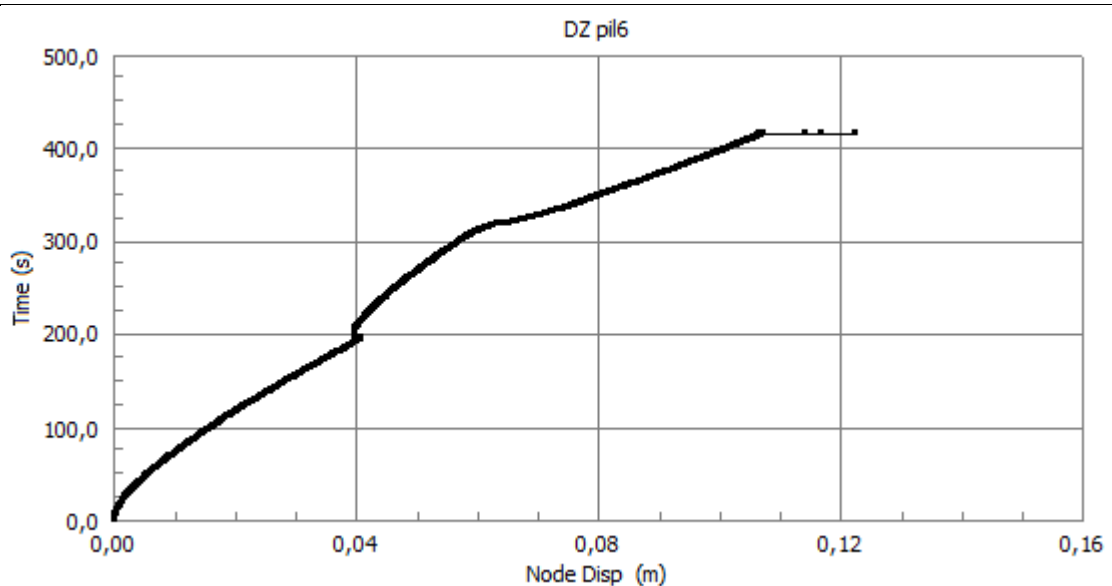
10



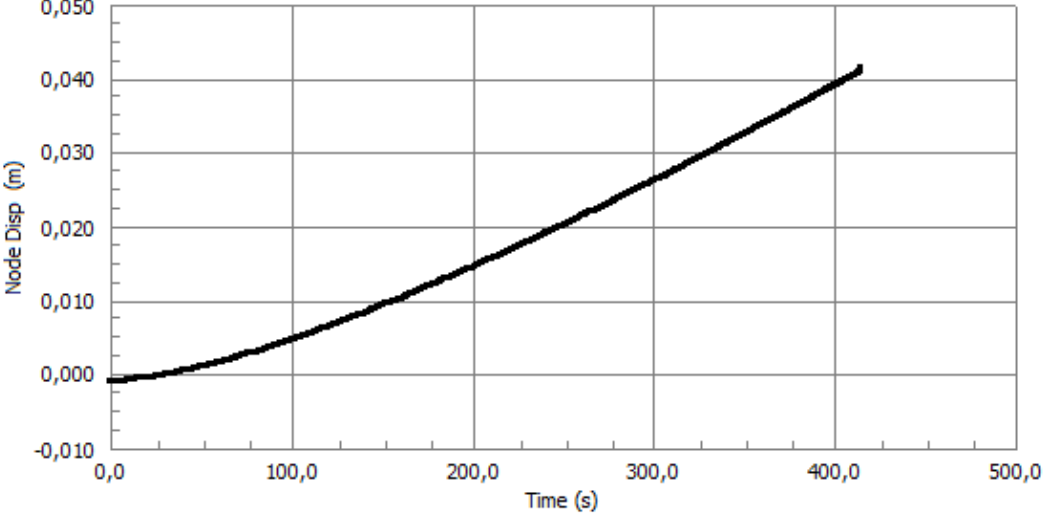
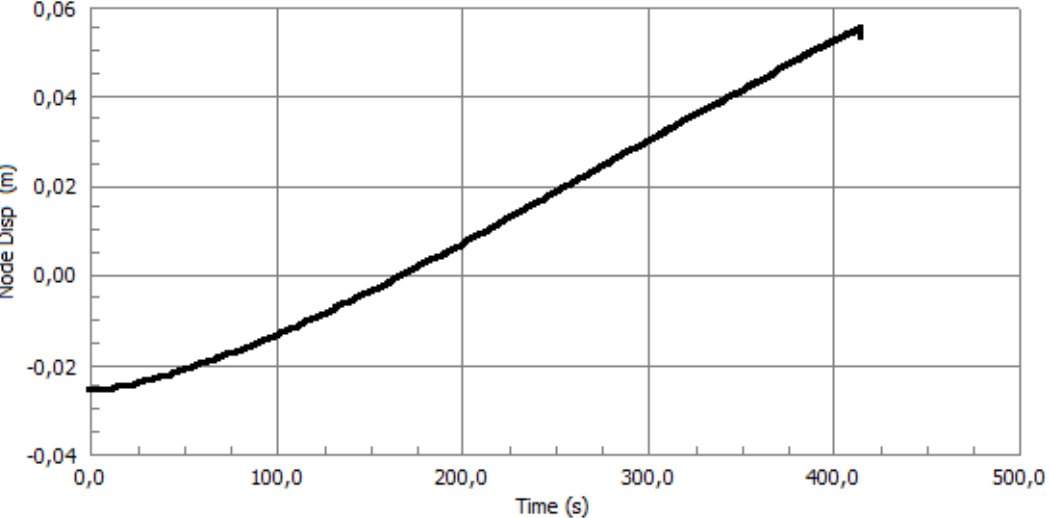
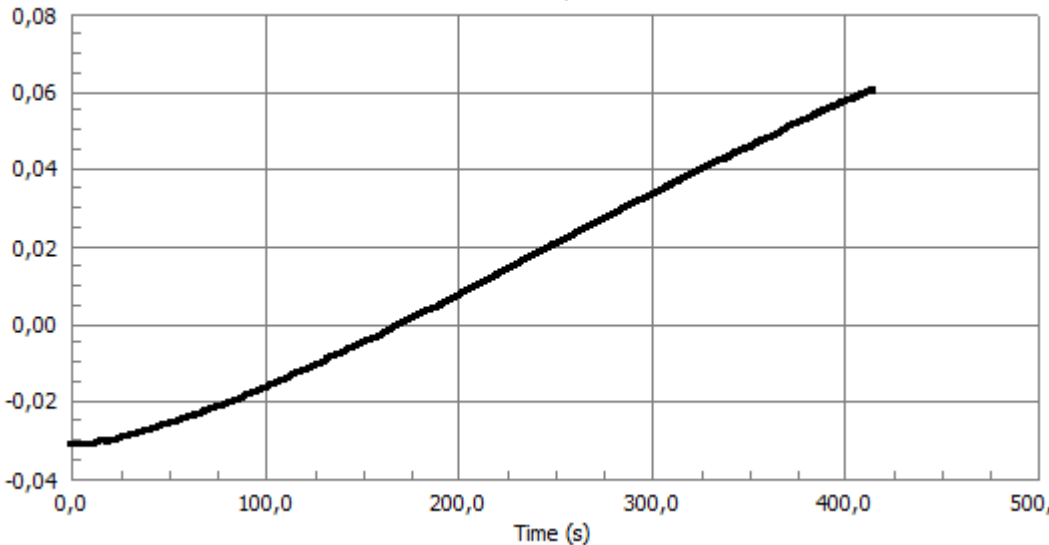
11



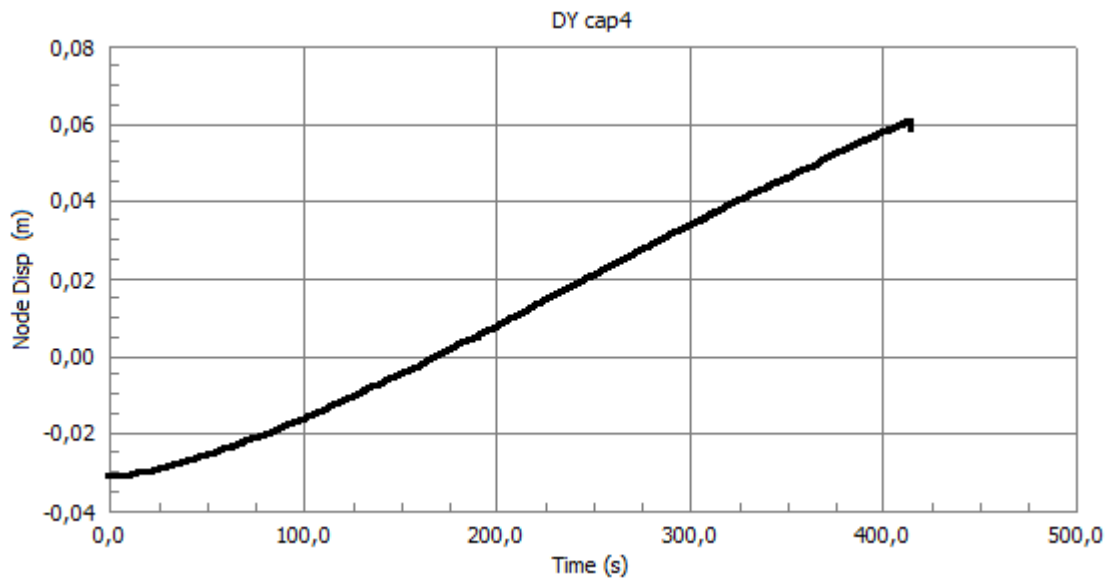
12



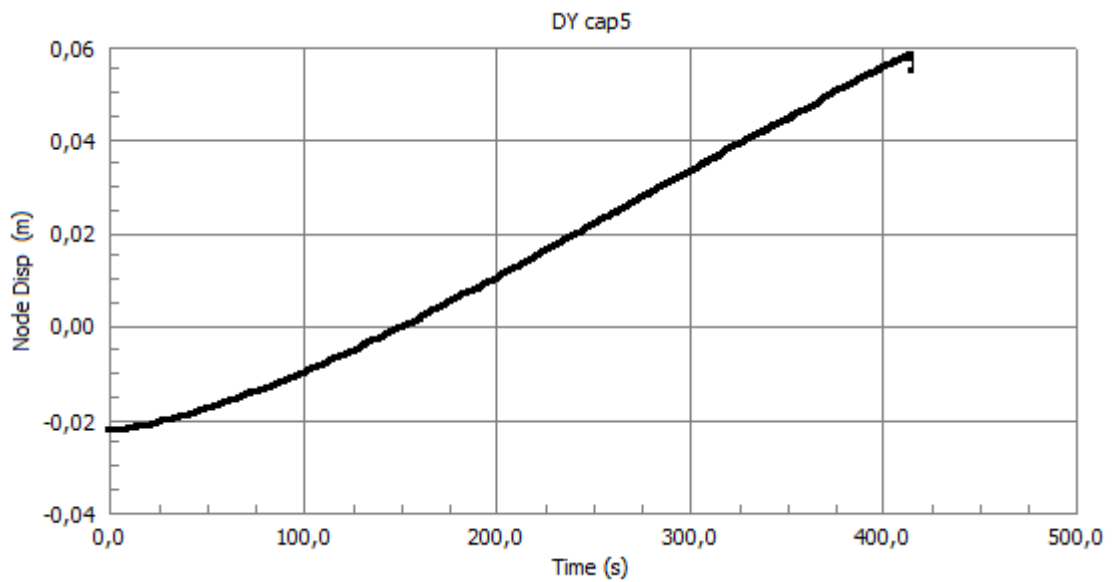
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico														
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 13: DY cap1</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>0,000</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>0,005</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>0,015</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>0,025</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>0,038</td></tr> <tr><td>410,0</td><td>0,042</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	0,000	100,0	0,005	200,0	0,015	300,0	0,025	400,0	0,038	410,0	0,042
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	0,000														
100,0	0,005														
200,0	0,015														
300,0	0,025														
400,0	0,038														
410,0	0,042														
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 14: DY cap2</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,025</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,015</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>0,000</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>0,025</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>0,045</td></tr> <tr><td>410,0</td><td>0,055</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,025	100,0	-0,015	200,0	0,000	300,0	0,025	400,0	0,045	410,0	0,055
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,025														
100,0	-0,015														
200,0	0,000														
300,0	0,025														
400,0	0,045														
410,0	0,055														
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 15: DY cap 3</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,030</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,015</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>0,000</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>0,025</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>0,050</td></tr> <tr><td>410,0</td><td>0,060</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,030	100,0	-0,015	200,0	0,000	300,0	0,025	400,0	0,050	410,0	0,060
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,030														
100,0	-0,015														
200,0	0,000														
300,0	0,025														
400,0	0,050														
410,0	0,060														

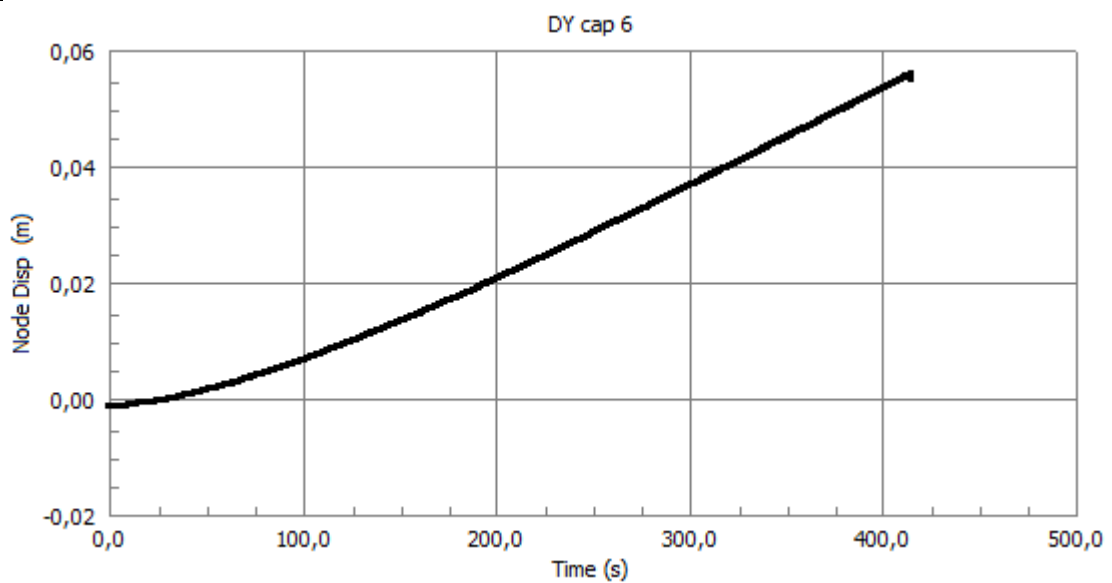
16



17



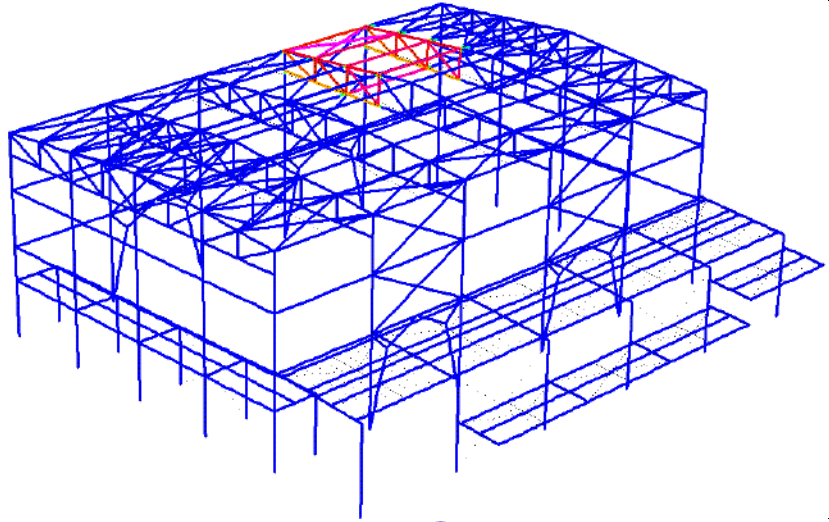
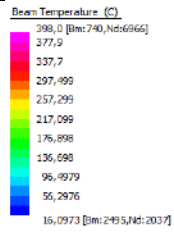
18



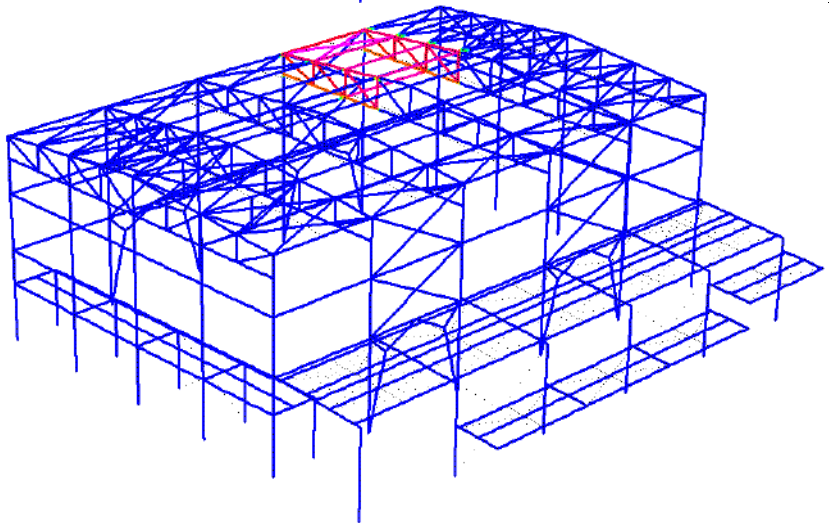
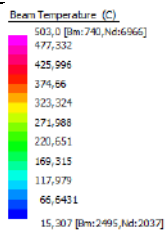
SCENARIO 1.1

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C)</p>
100	<p>Beam Temperature (C)</p>
200	<p>Beam Temperature (C)</p>

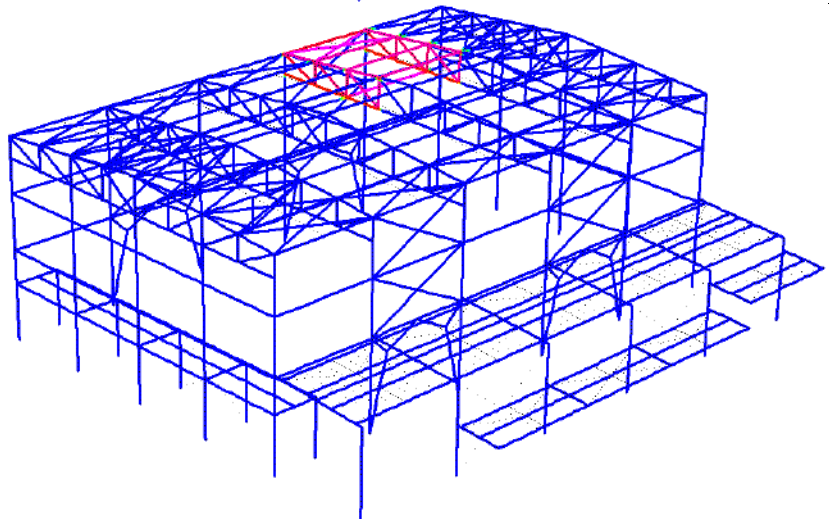
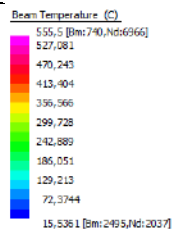
300



400



467

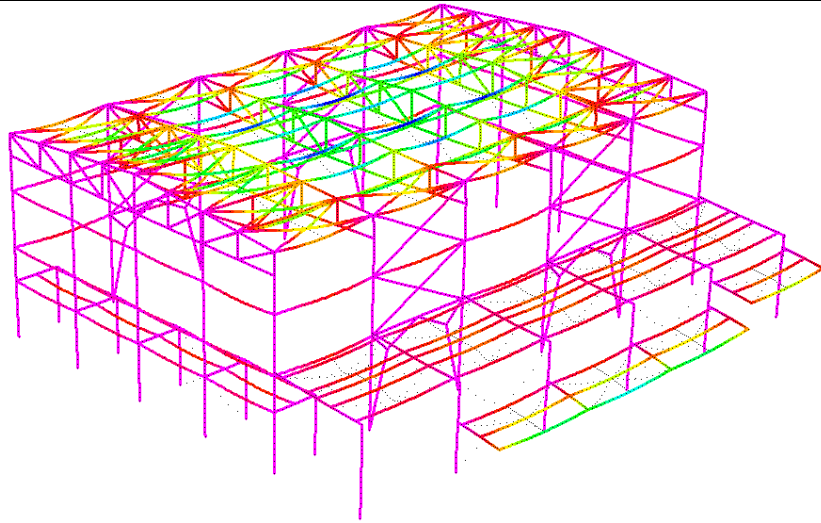
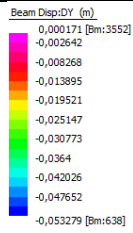


Analisi Meccanica

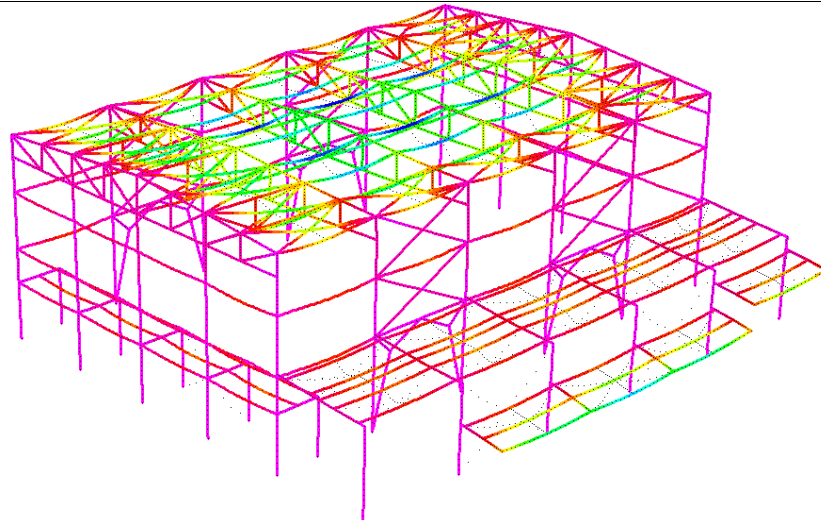
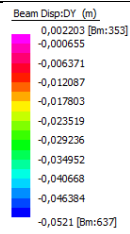
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

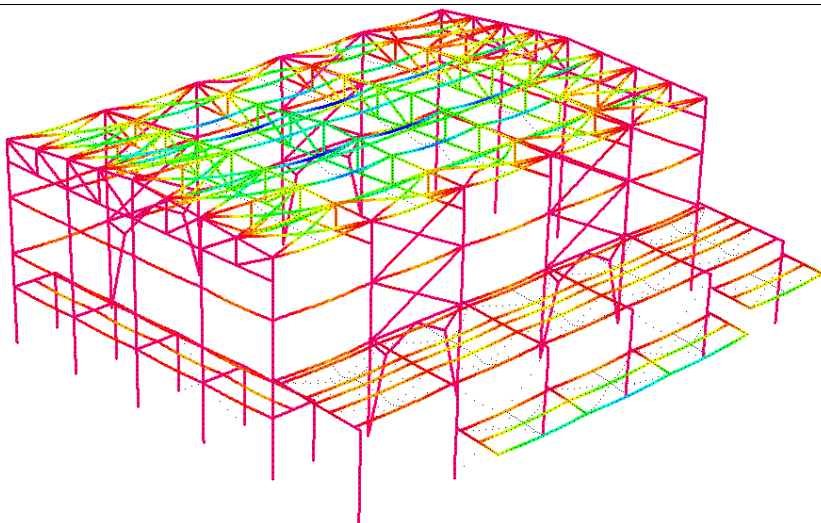
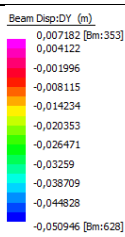
1

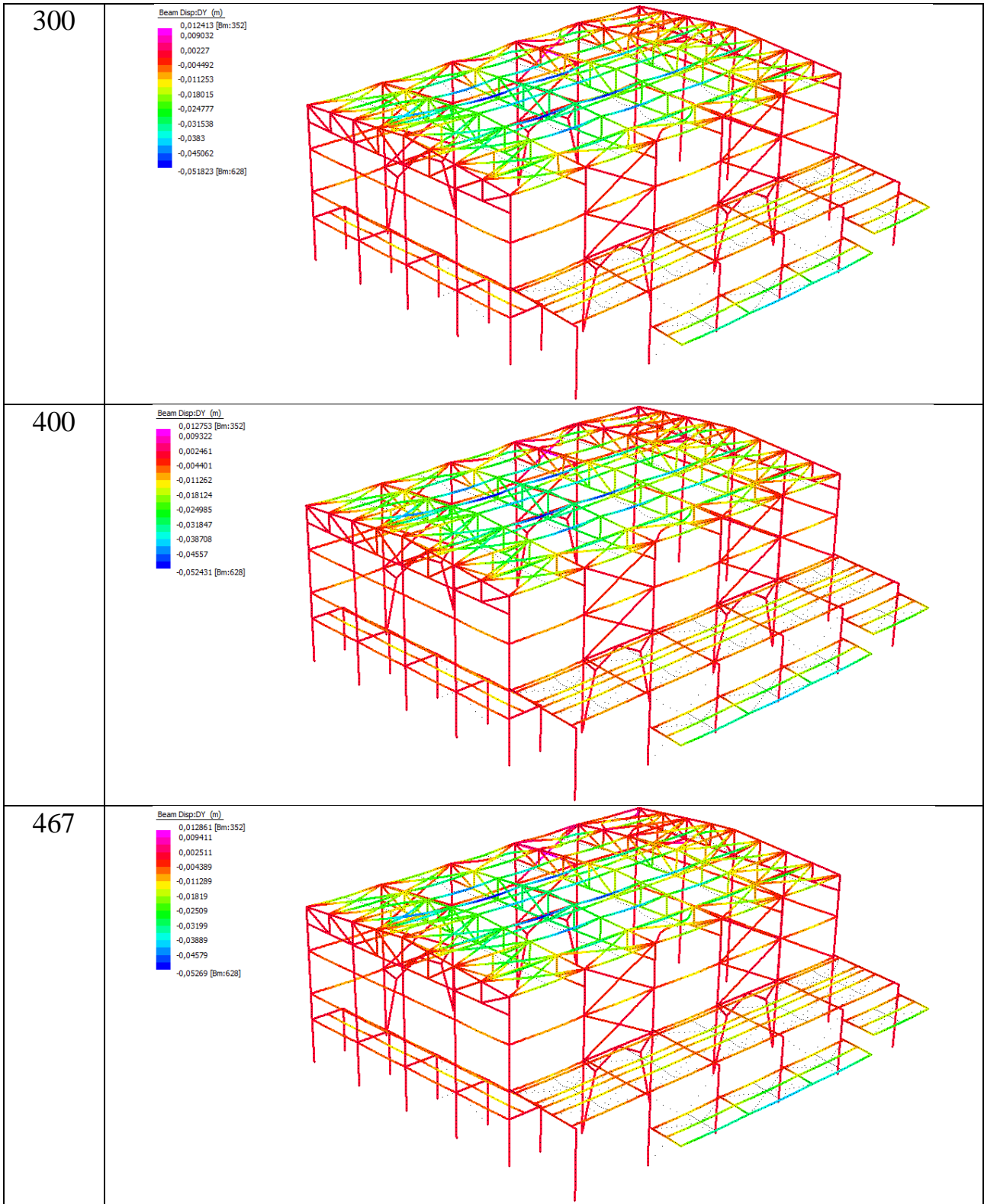


100

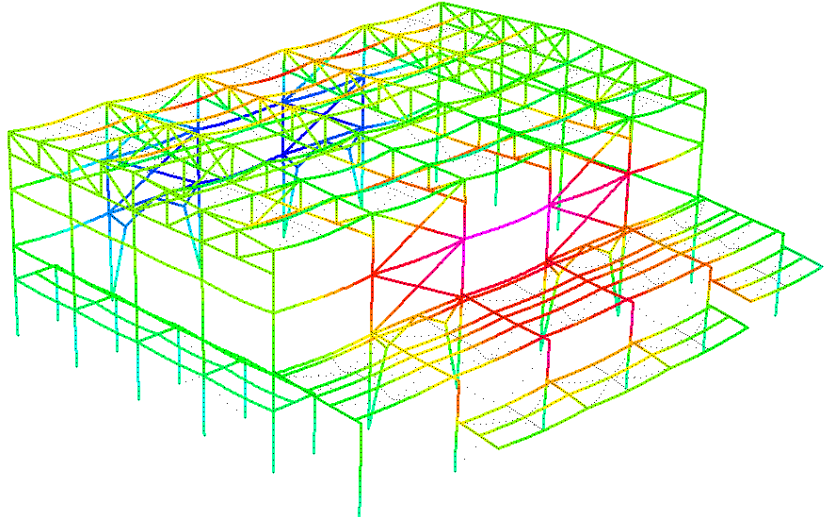
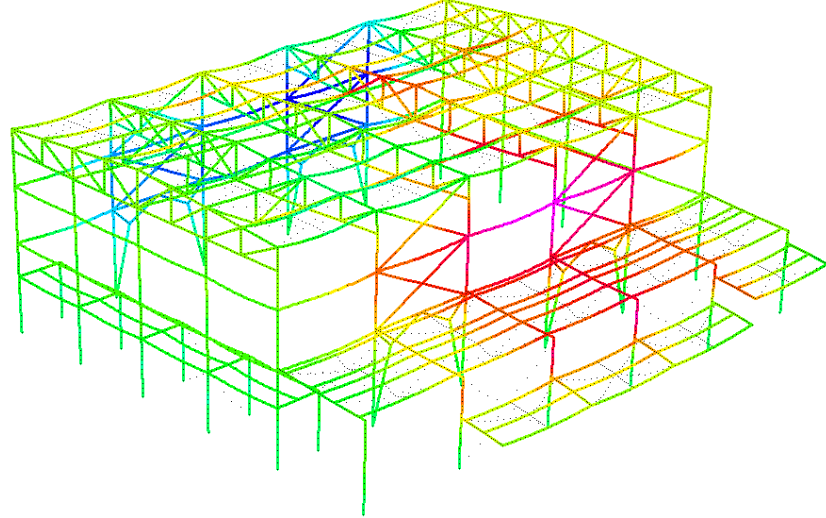
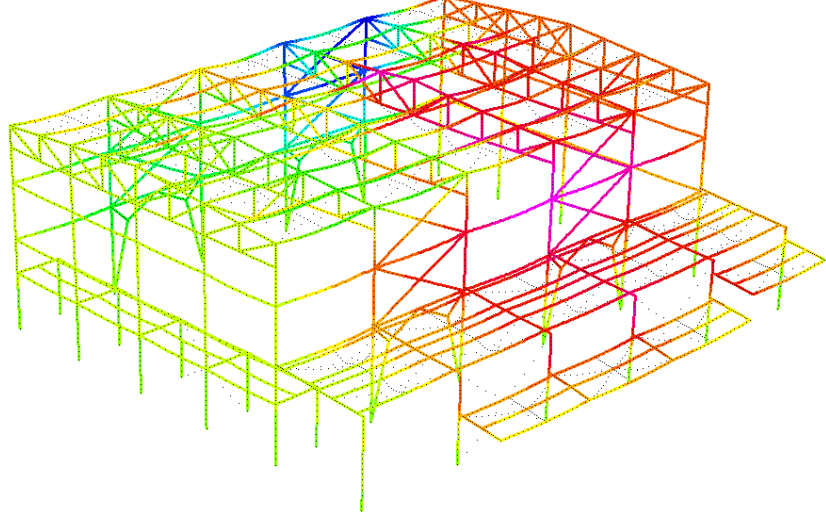


200

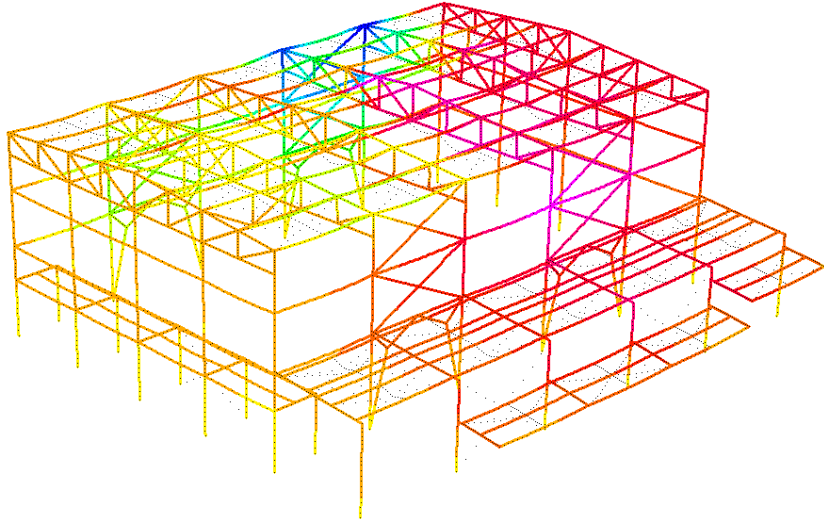
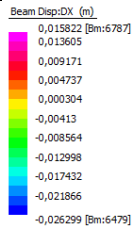




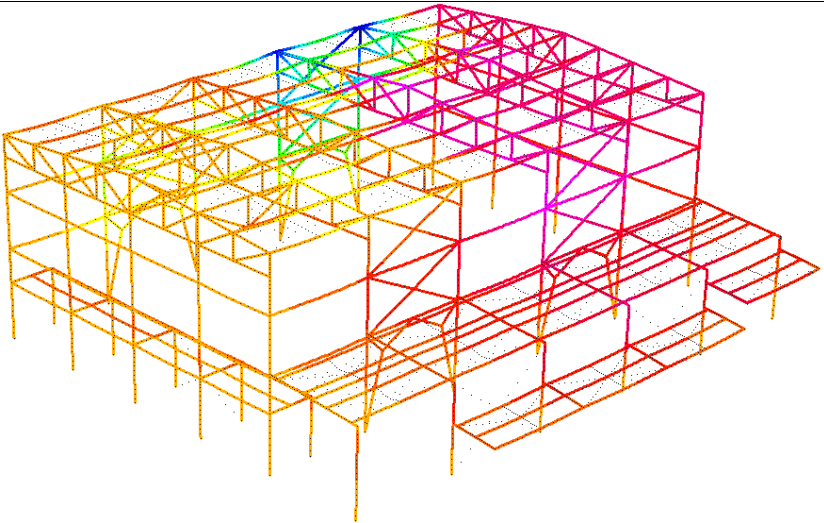
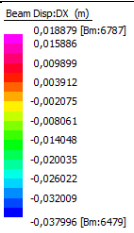
Analisi Meccanica

Tempo s	Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X
1	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p style="font-size: 8px;">Beam Disp:DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0,010304 [Bm:326] 0,009556 0,00861 0,006565 0,00507 0,003574 0,002079 0,000583 -0,000912 -0,002408 -0,003903 [Bm:2636] </div>  </div>
100	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p style="font-size: 8px;">Beam Disp:DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0,011082 [Bm:3263] 0,010195 0,00842 0,006644 0,004869 0,003094 0,001319 -0,000456 -0,002232 -0,004007 -0,005782 [Bm:2823] </div>  </div>
200	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p style="font-size: 8px;">Beam Disp:DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0,012761 [Bm:3262] 0,011378 0,008613 0,005848 0,003082 0,000317 -0,002448 -0,005214 -0,007979 -0,010744 -0,01351 [Bm:6479] </div>  </div>

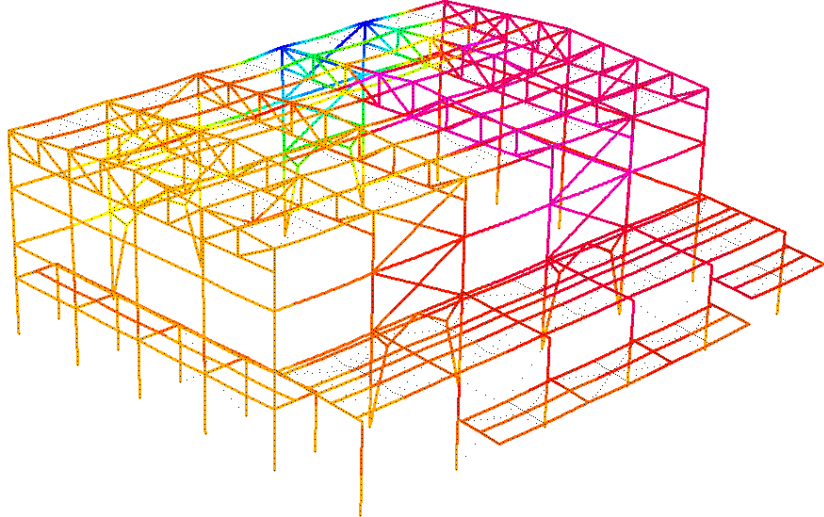
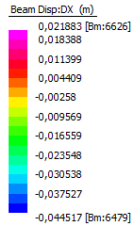
300



400



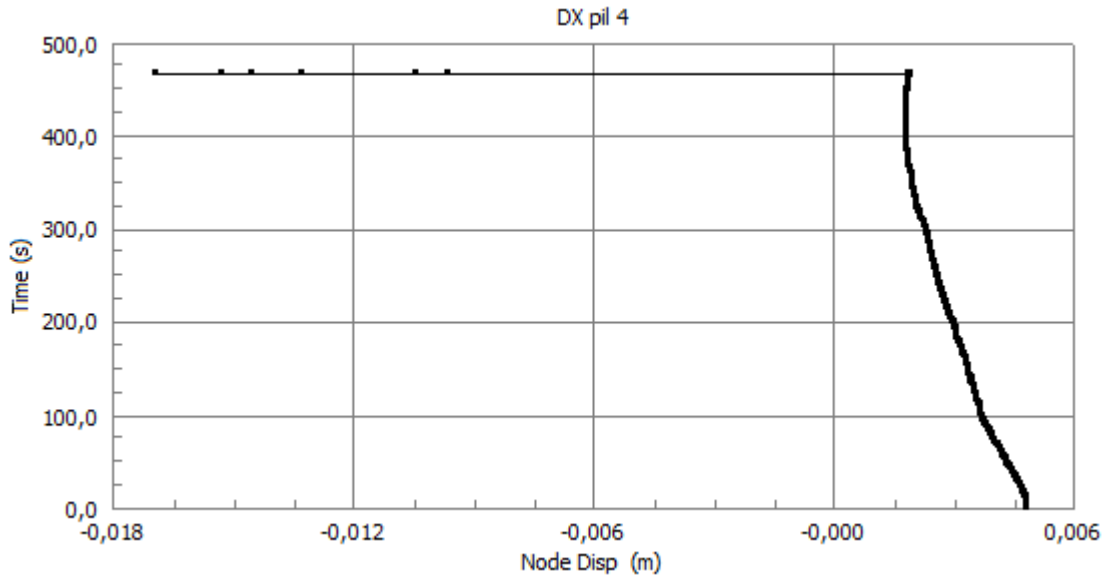
467



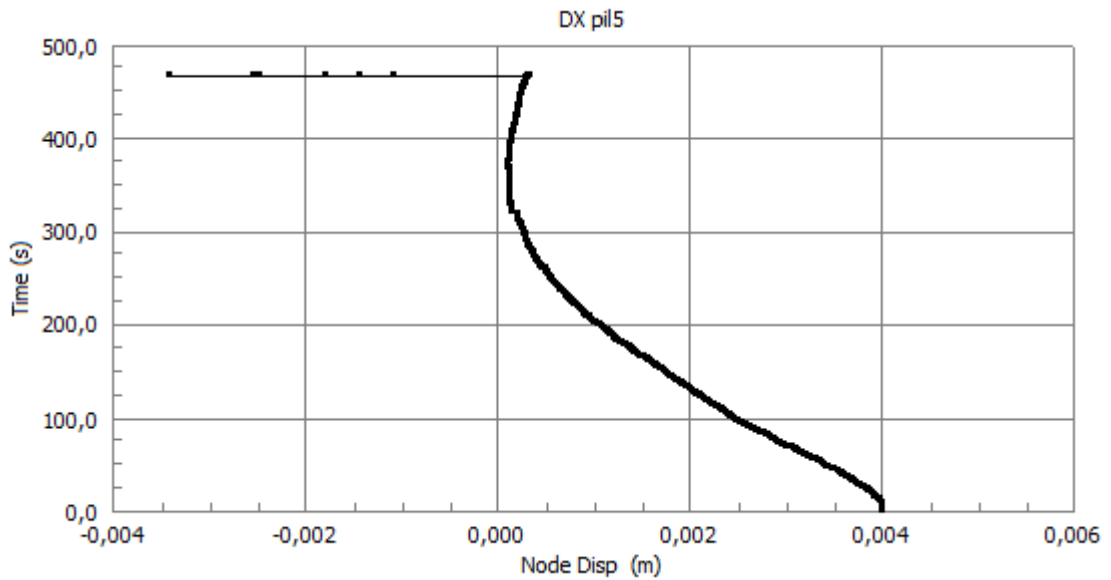
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>

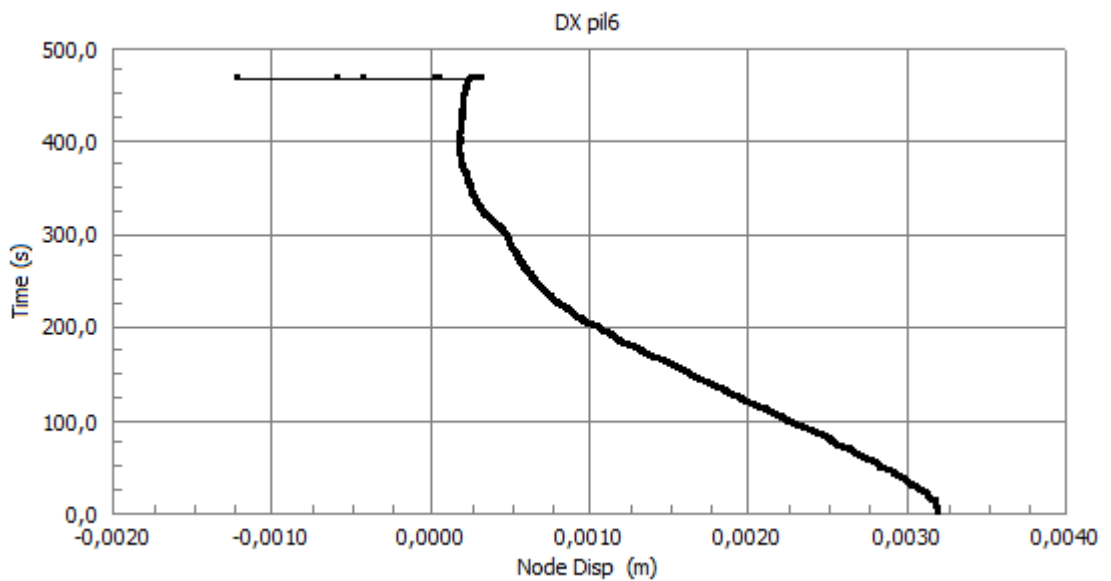
4



5



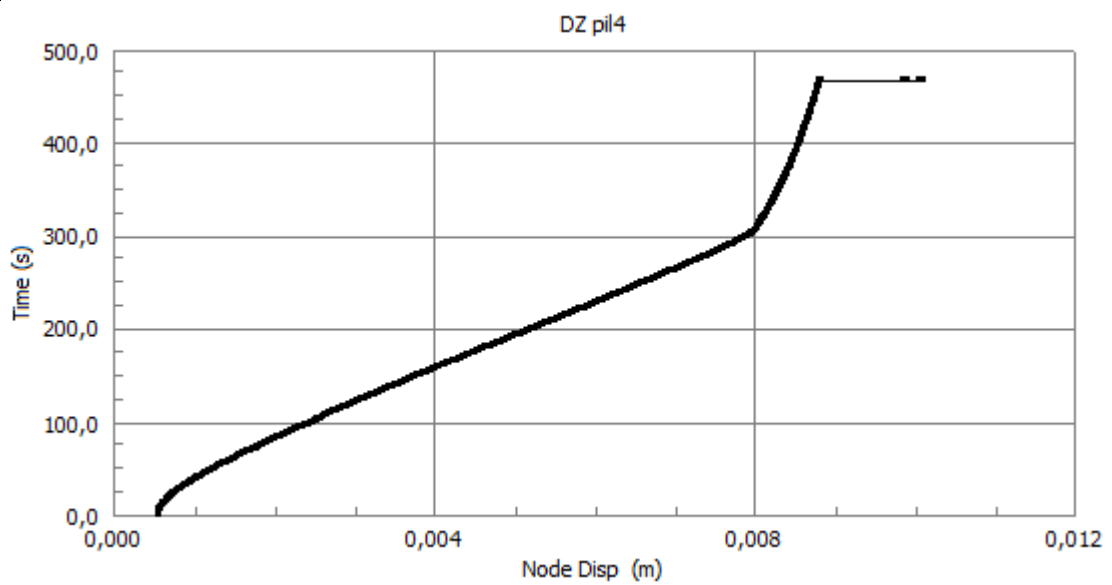
6



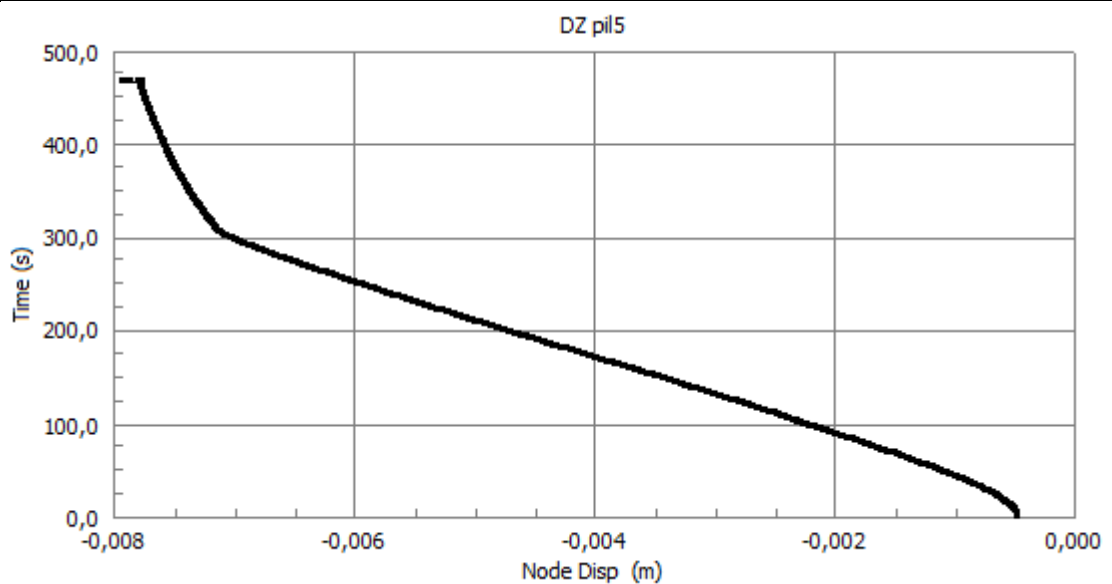
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p>

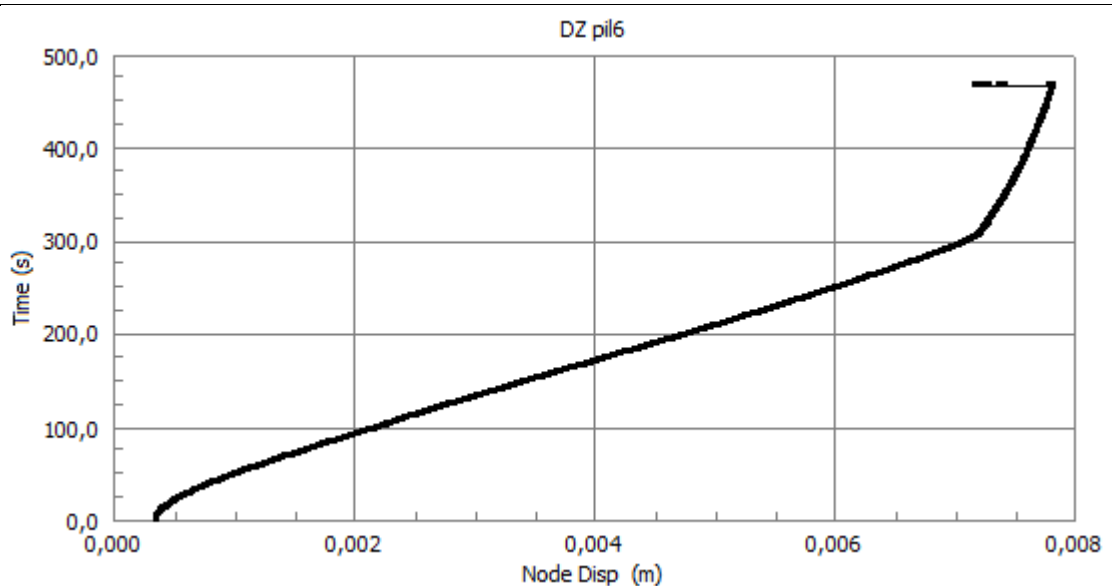
10



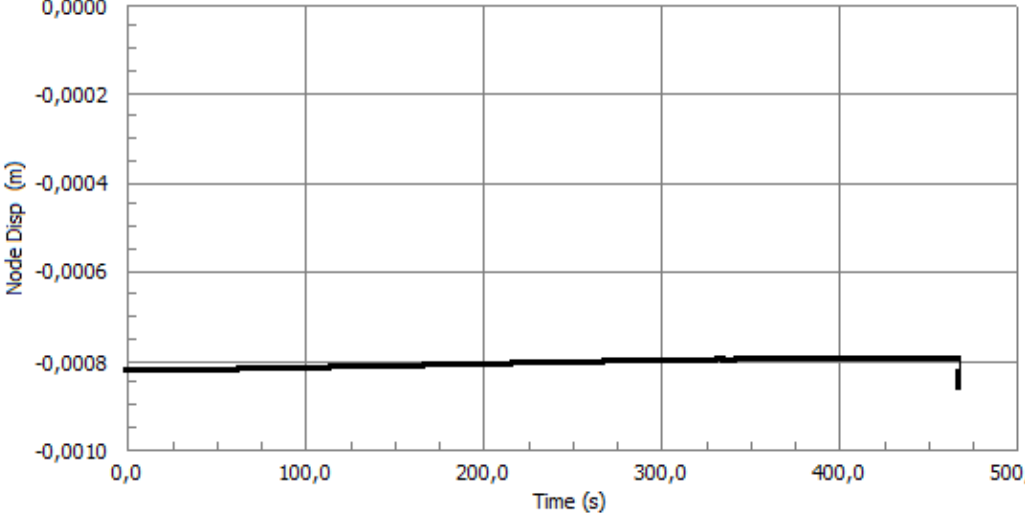
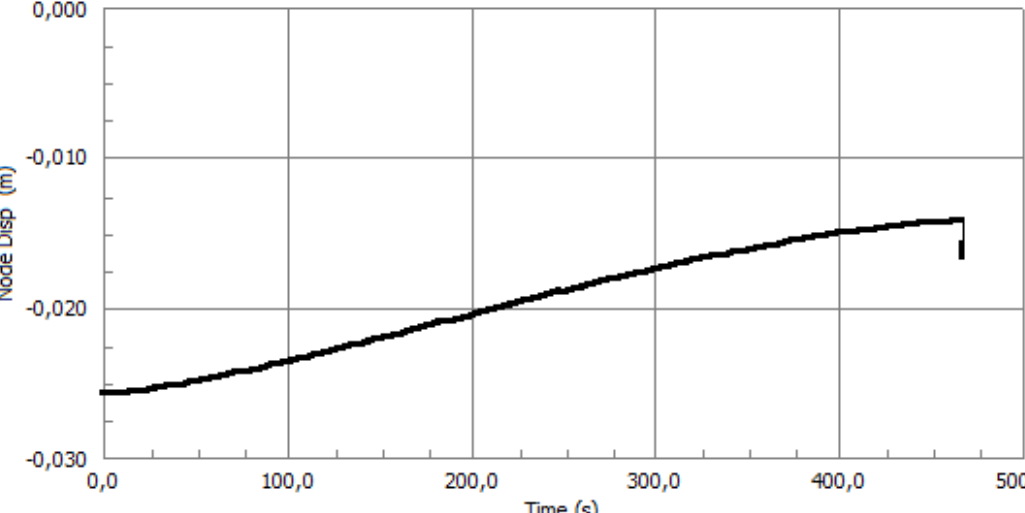
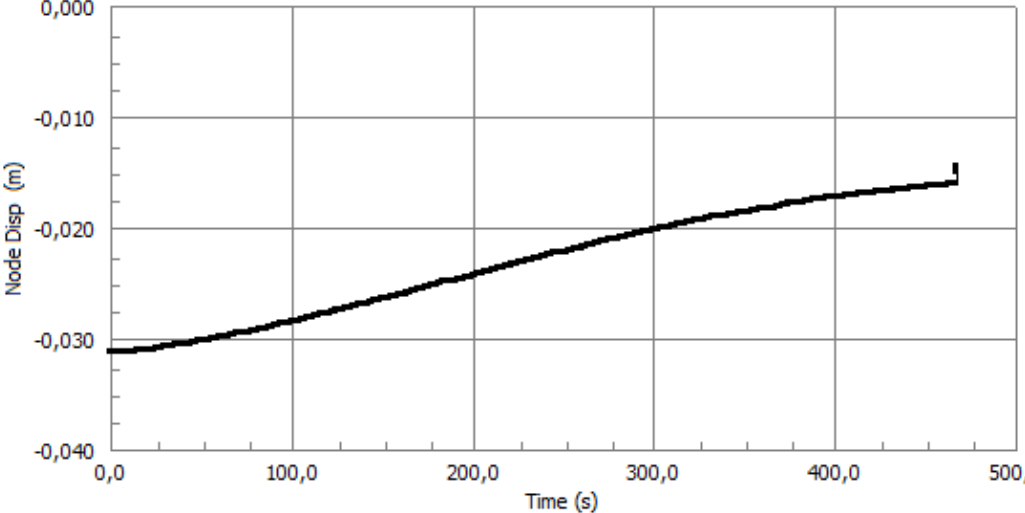
11



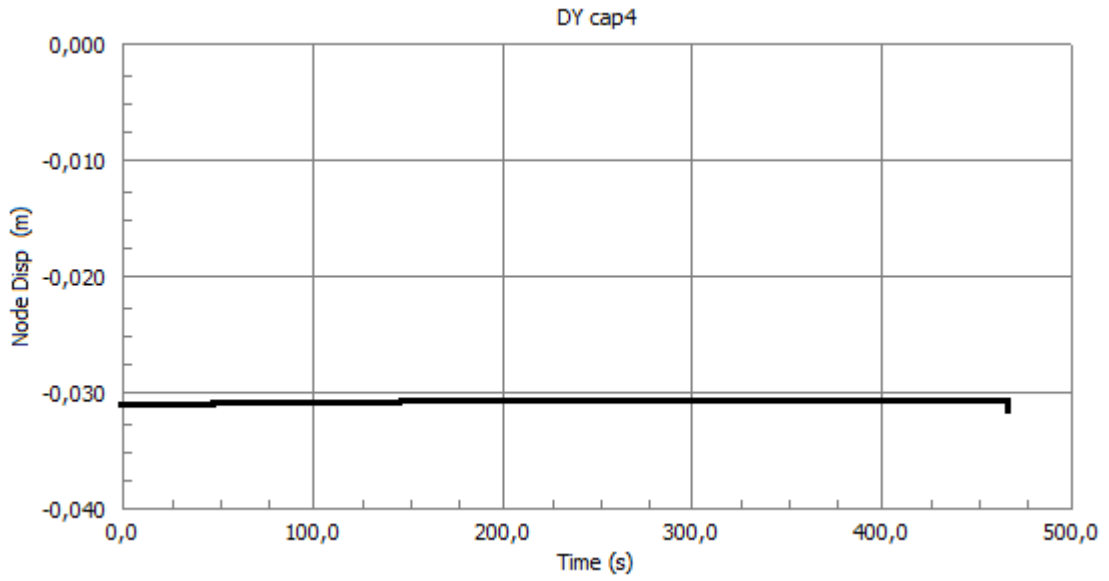
12



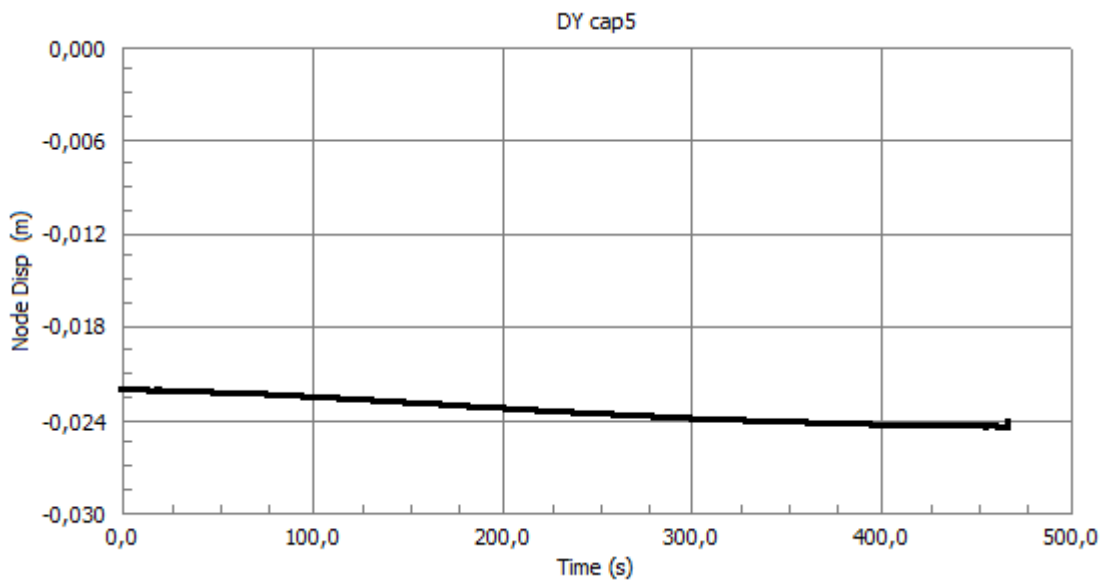
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico														
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 13: DY cap1</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>460,0</td><td>-0,0009</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,0008	100,0	-0,0008	200,0	-0,0008	300,0	-0,0008	400,0	-0,0008	460,0	-0,0009
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,0008														
100,0	-0,0008														
200,0	-0,0008														
300,0	-0,0008														
400,0	-0,0008														
460,0	-0,0009														
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 14: DY cap2</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,025</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,023</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>-0,021</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>-0,018</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>-0,016</td></tr> <tr><td>460,0</td><td>-0,014</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,025	100,0	-0,023	200,0	-0,021	300,0	-0,018	400,0	-0,016	460,0	-0,014
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,025														
100,0	-0,023														
200,0	-0,021														
300,0	-0,018														
400,0	-0,016														
460,0	-0,014														
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 15: DY cap 3</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,031</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,028</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>-0,025</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>-0,021</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>-0,018</td></tr> <tr><td>460,0</td><td>-0,015</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,031	100,0	-0,028	200,0	-0,025	300,0	-0,021	400,0	-0,018	460,0	-0,015
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,031														
100,0	-0,028														
200,0	-0,025														
300,0	-0,021														
400,0	-0,018														
460,0	-0,015														

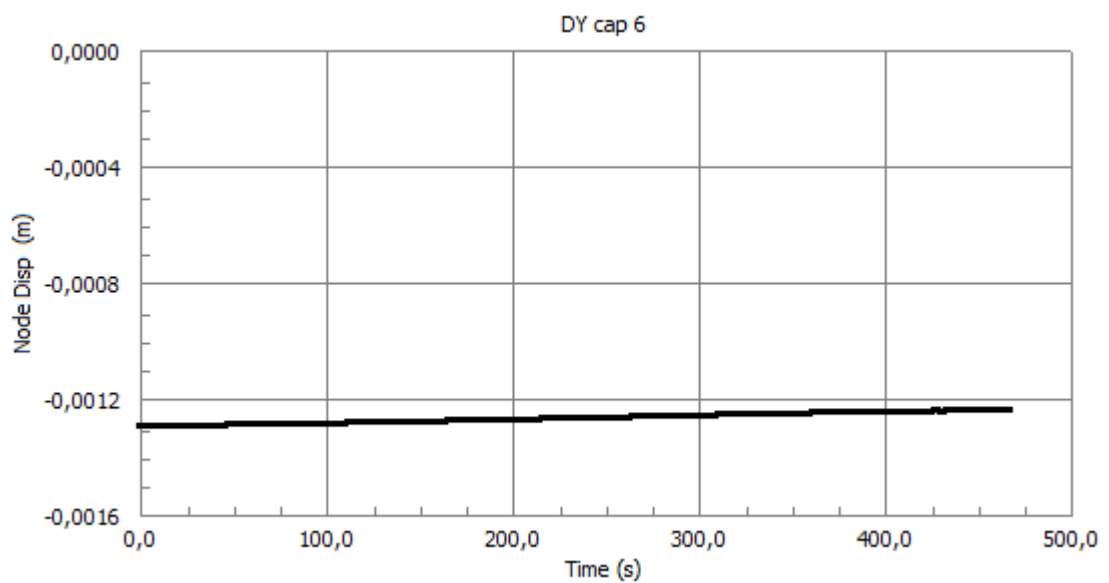
16



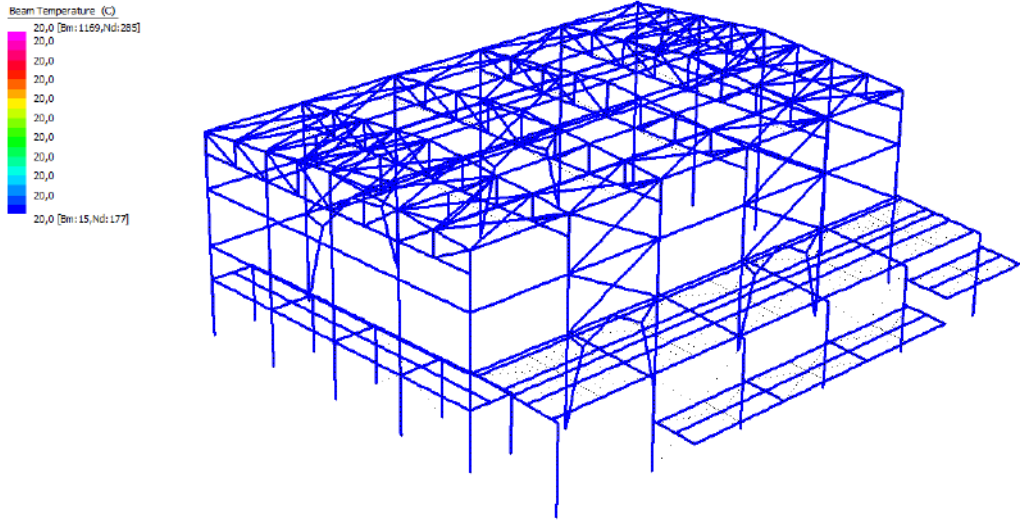
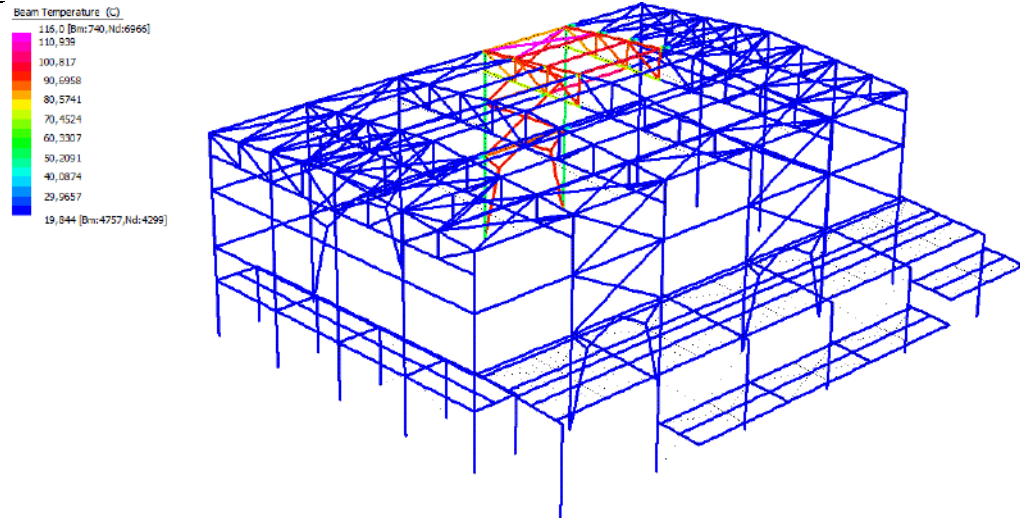
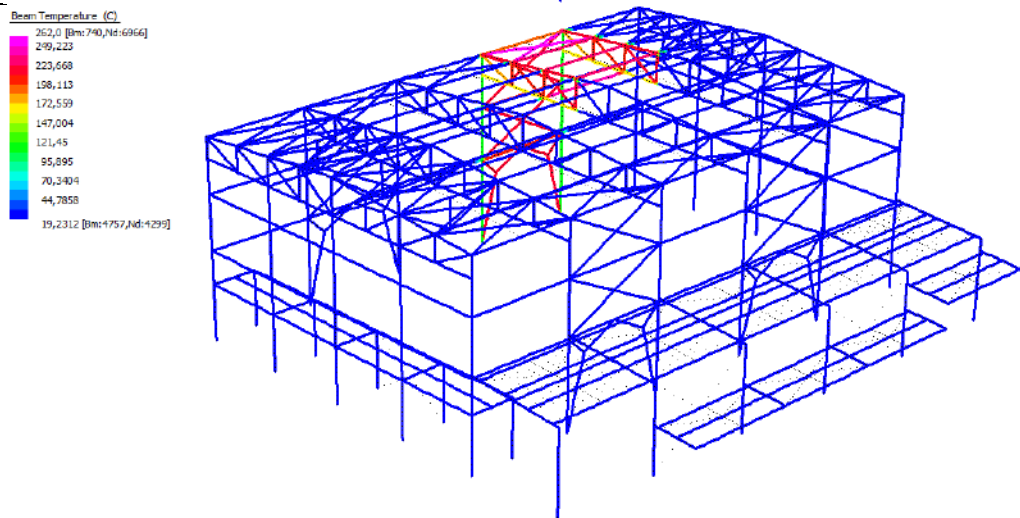
17



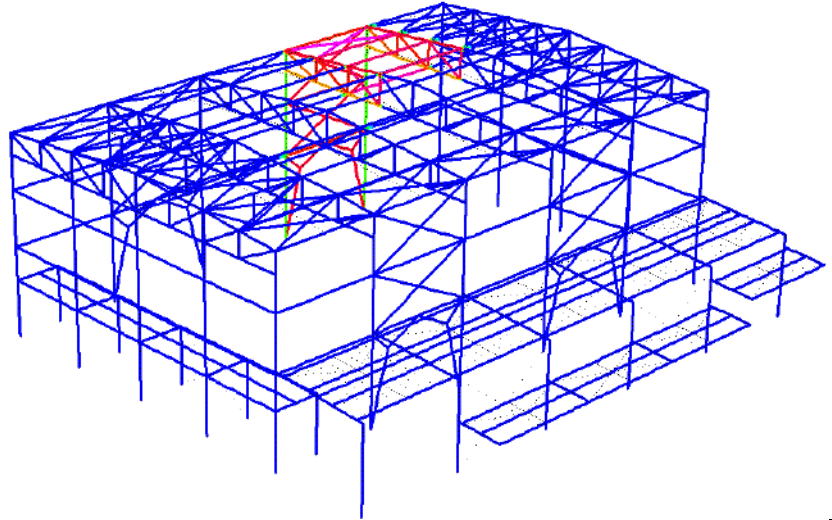
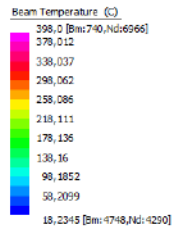
18



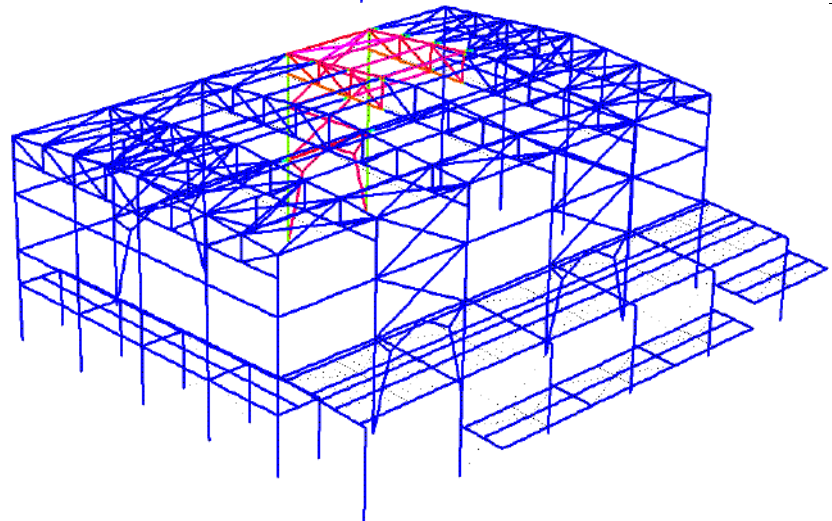
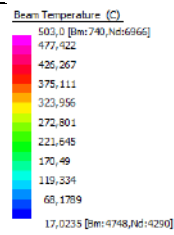
SCENARIO 1.2

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>20,0 [Bm: L169,Id:285]</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0 [Bm: L5,Id:177]</p>
100	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>116,0 [Bm:740,Id:6966]</p> <p>110,939</p> <p>100,817</p> <p>90,6958</p> <p>80,5741</p> <p>70,4524</p> <p>60,3307</p> <p>50,2091</p> <p>40,0874</p> <p>29,9657</p> <p>19,844 [Bm:4757,Id:4299]</p>
200	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>262,0 [Bm:740,Id:6966]</p> <p>249,223</p> <p>223,668</p> <p>198,113</p> <p>172,559</p> <p>147,004</p> <p>121,45</p> <p>95,895</p> <p>70,3404</p> <p>44,7858</p> <p>19,2312 [Bm:4757,Id:4299]</p>

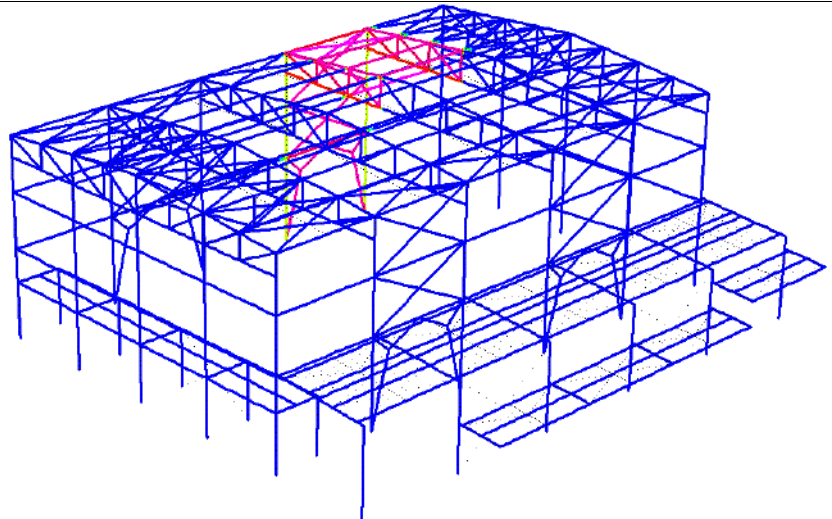
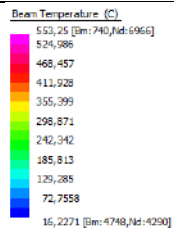
300



400



463

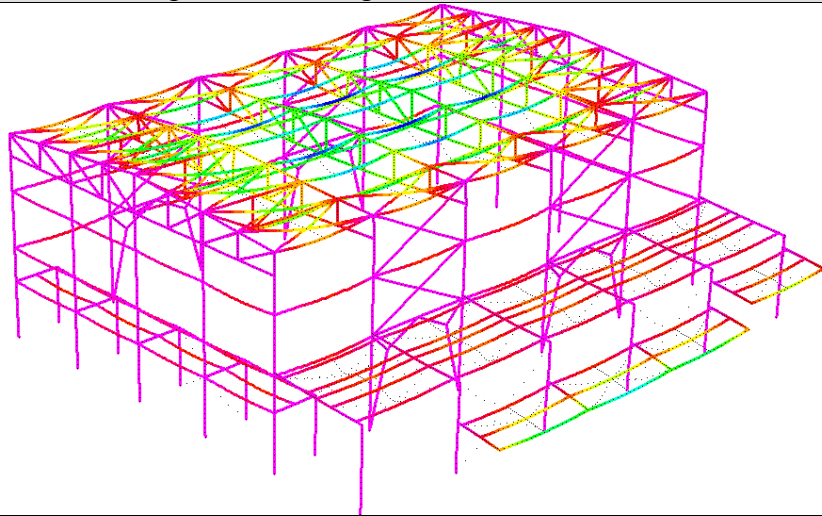
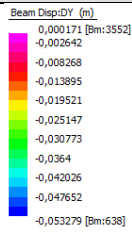


Analisi Meccanica

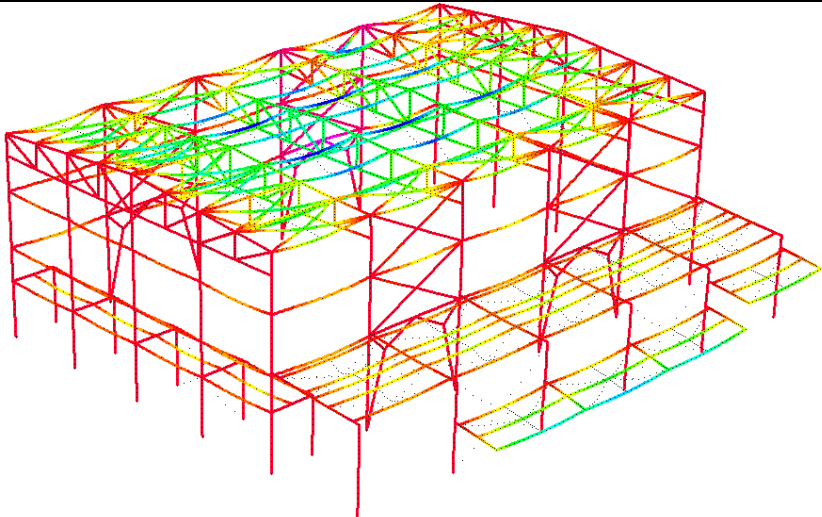
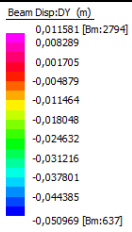
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

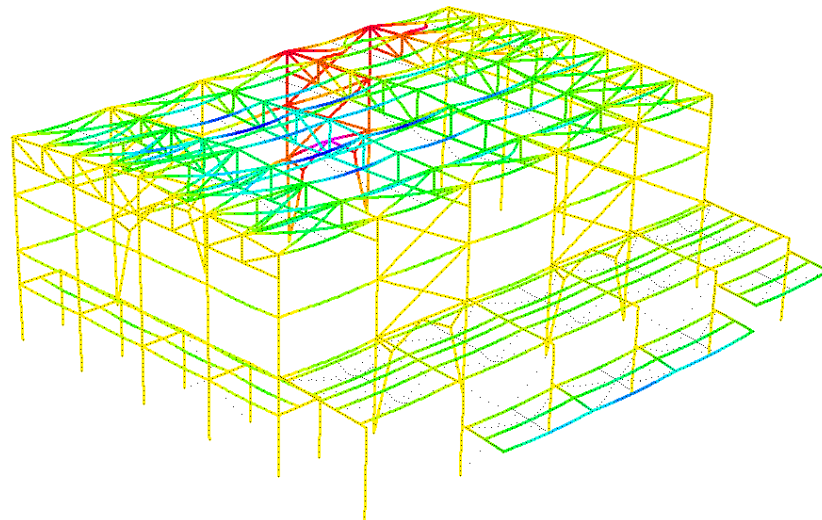
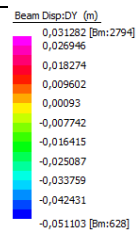
1



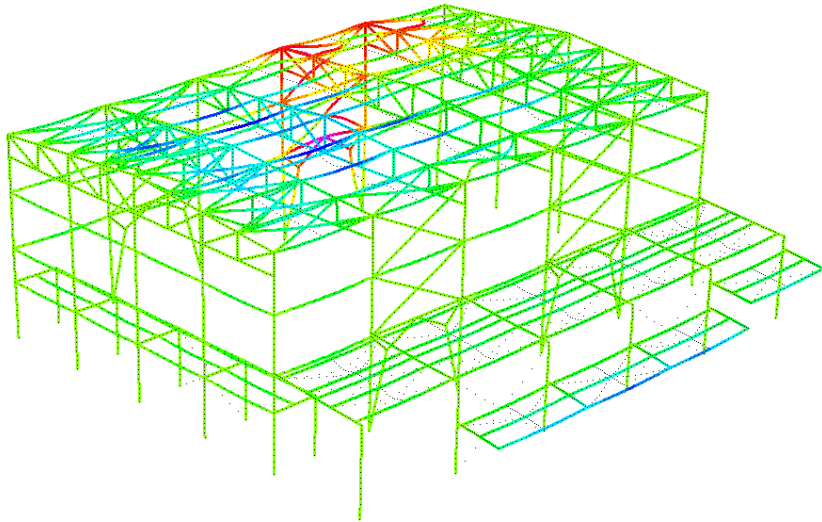
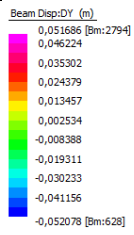
100



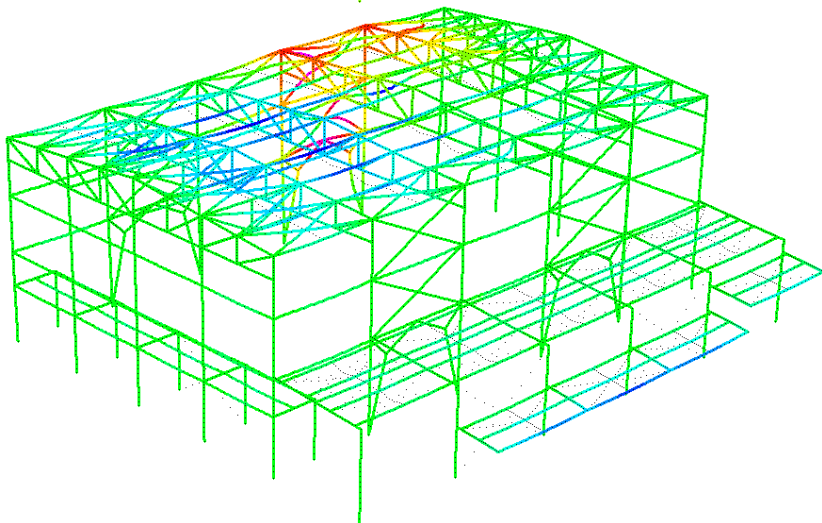
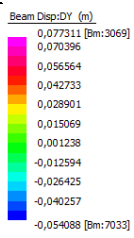
200



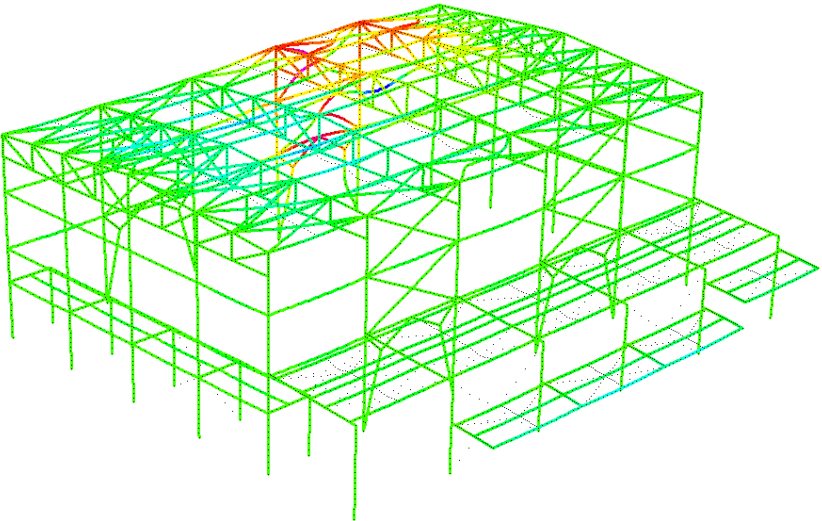
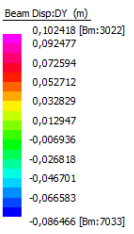
300



400



463

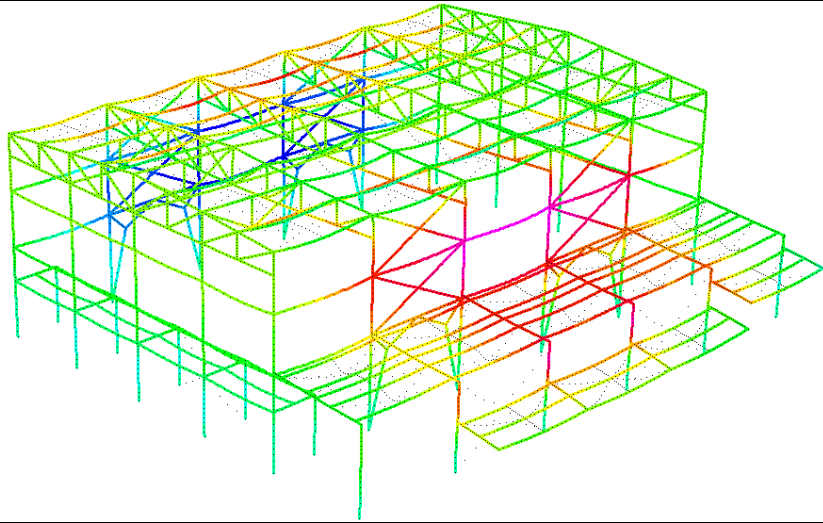
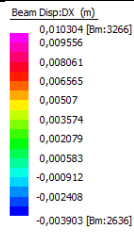


Analisi Meccanica

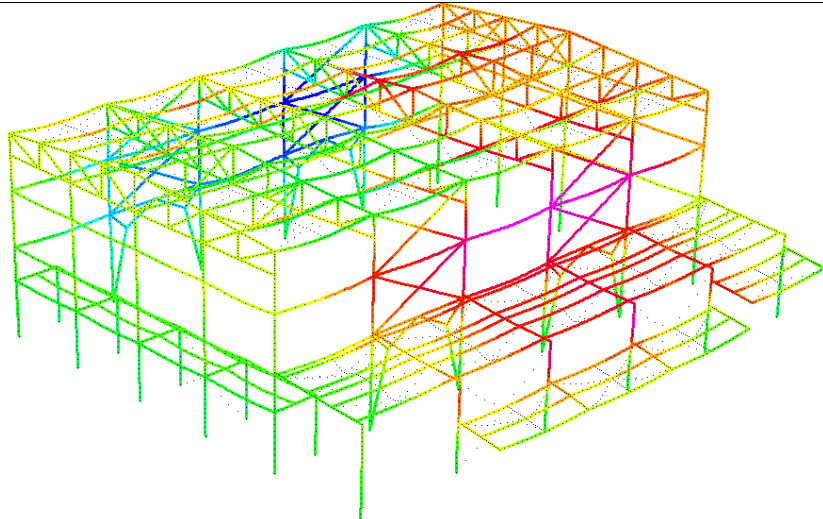
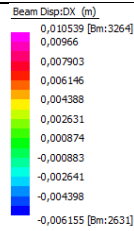
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

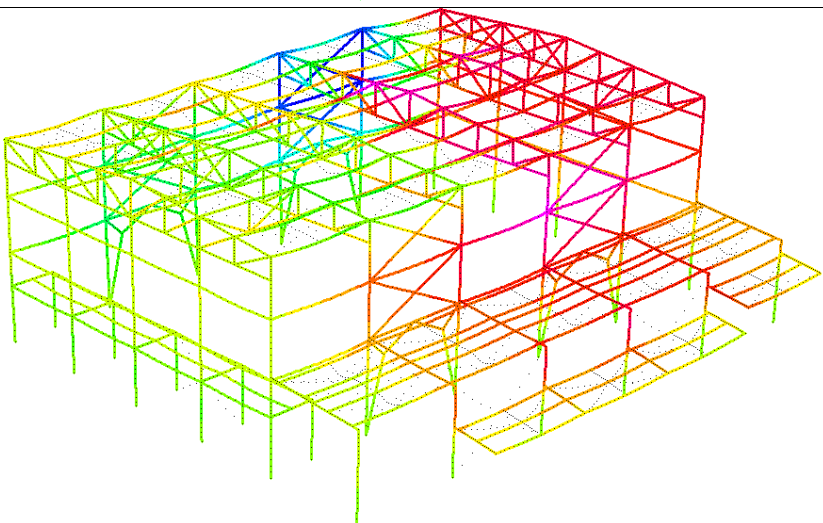
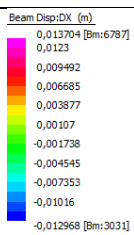
1

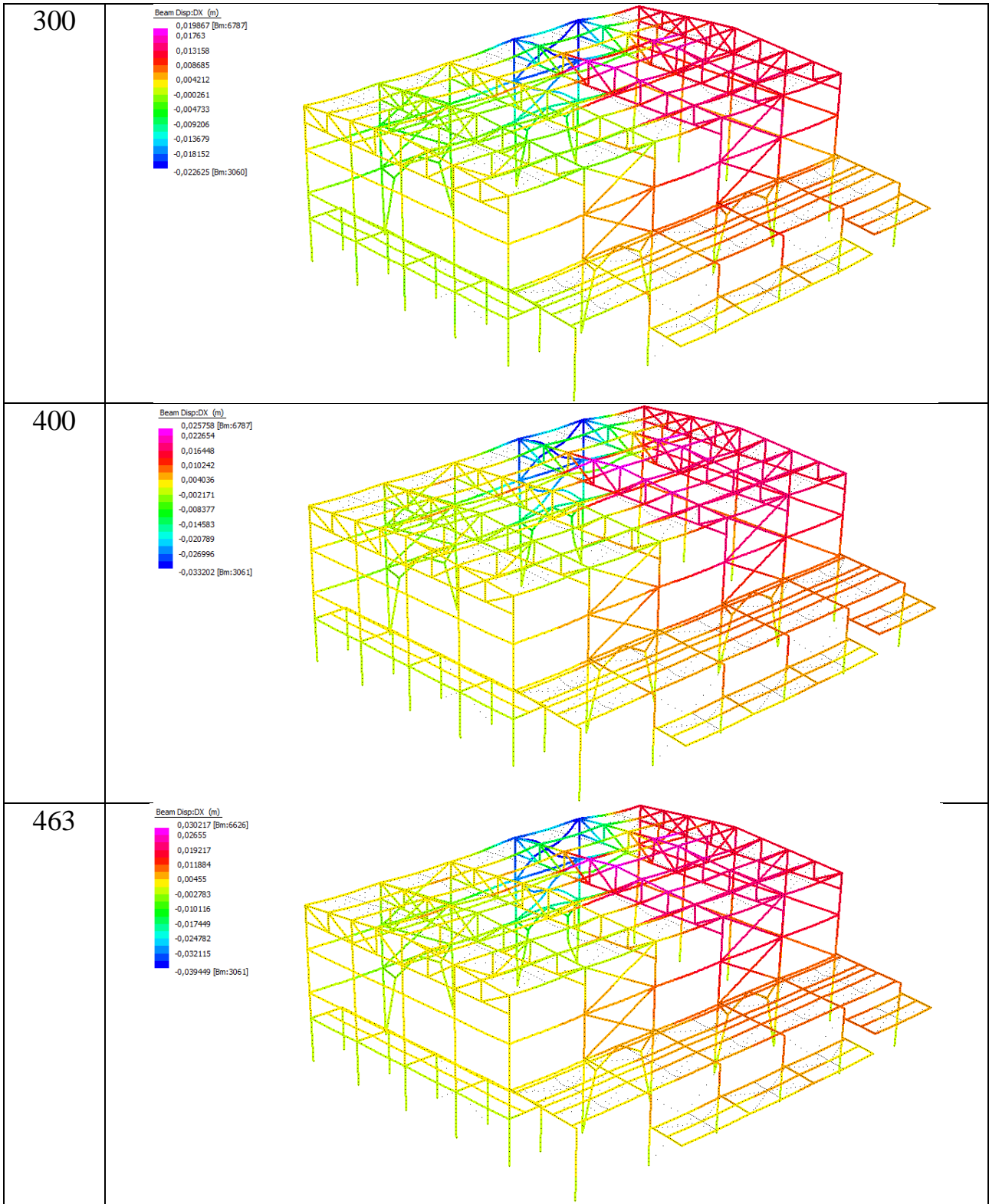


100



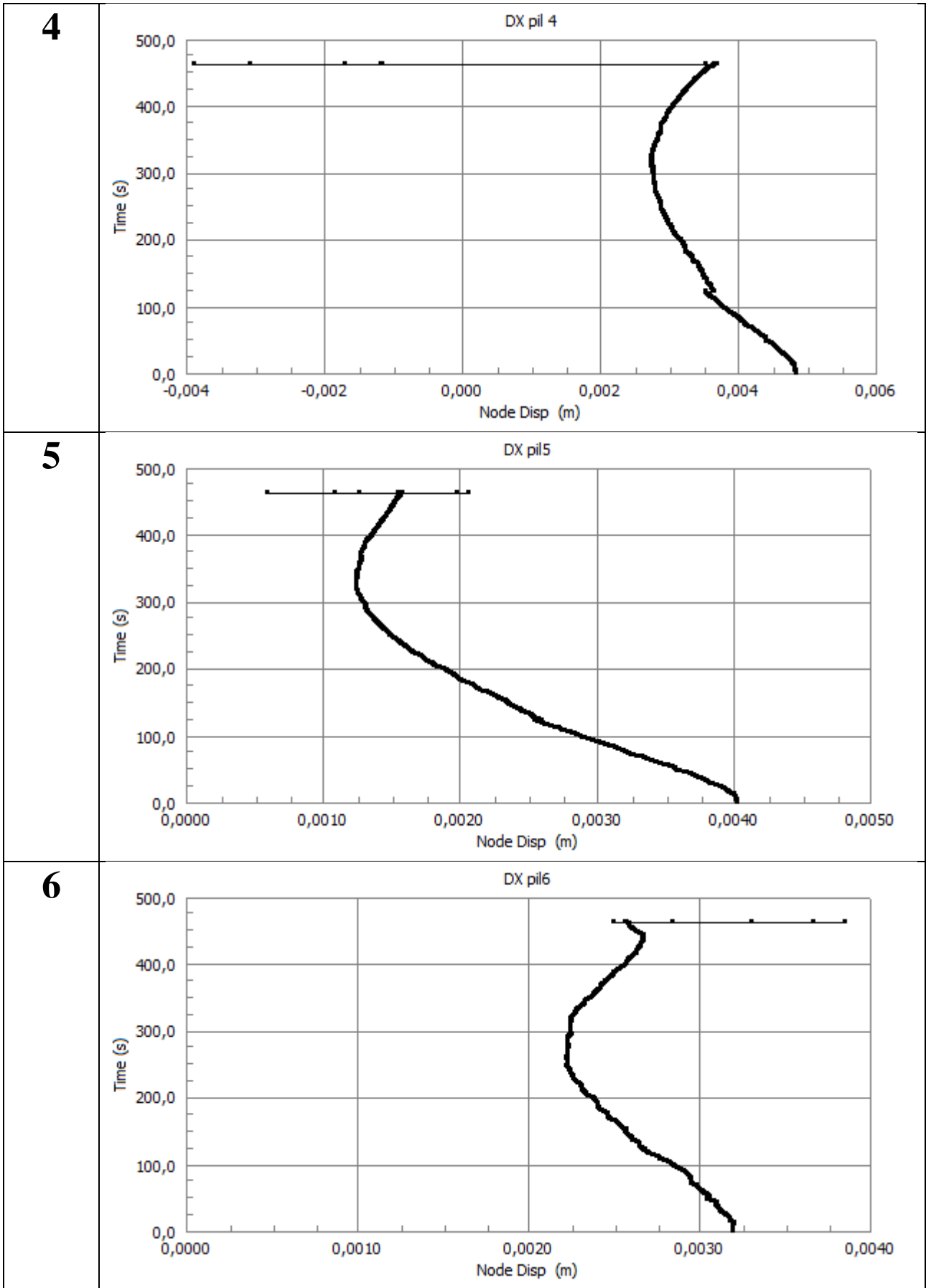
200





Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

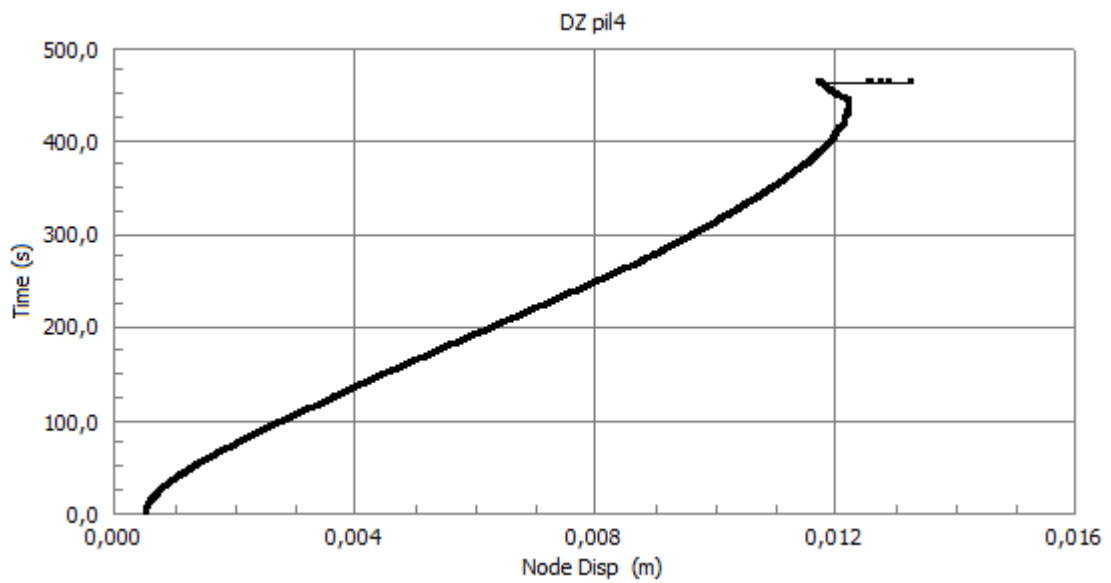
Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p>
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p>
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p>



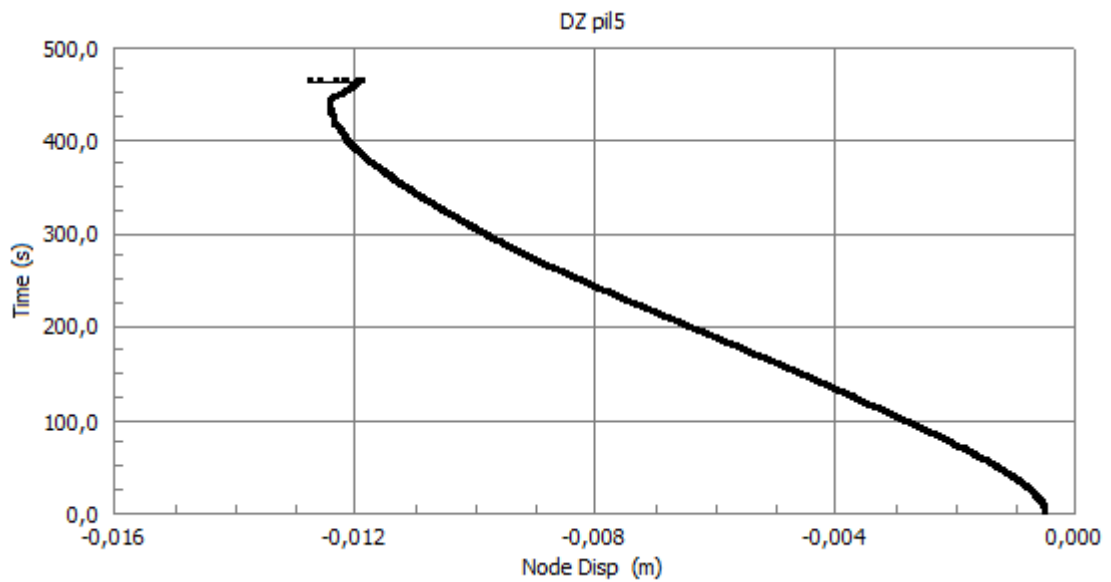
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p>

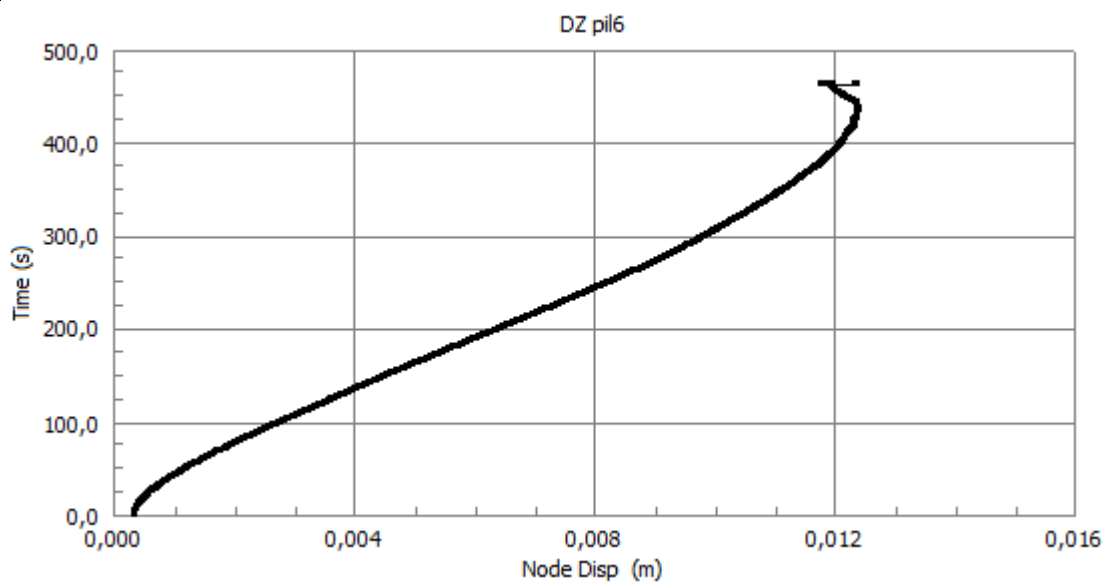
10



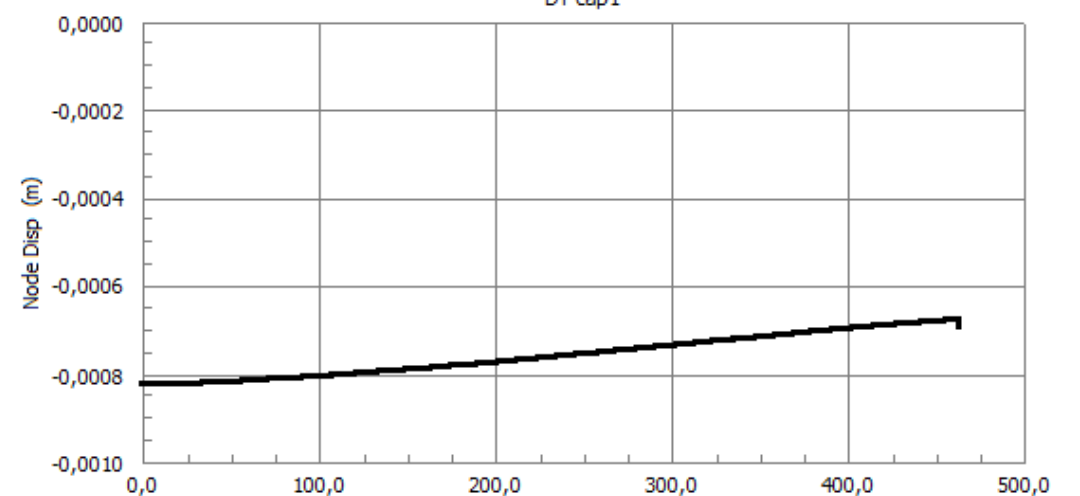
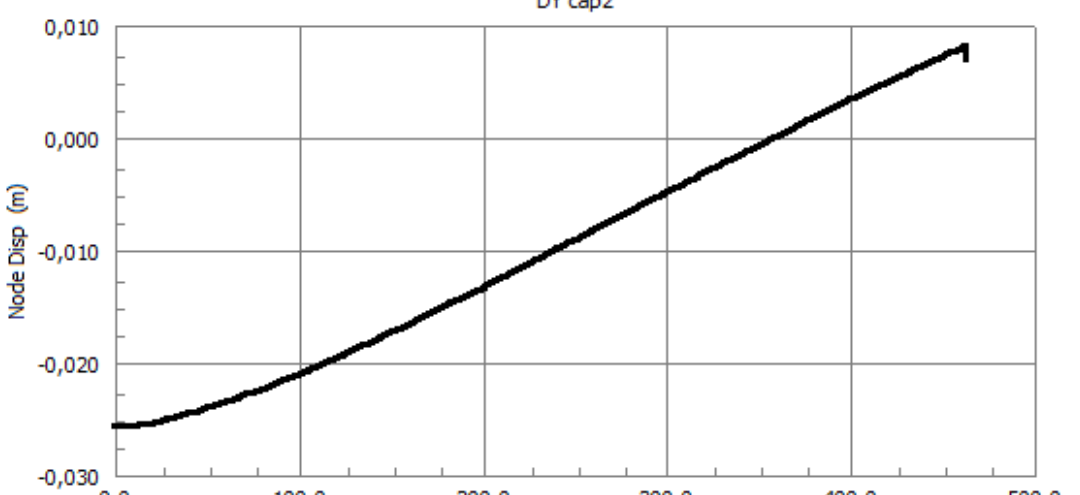
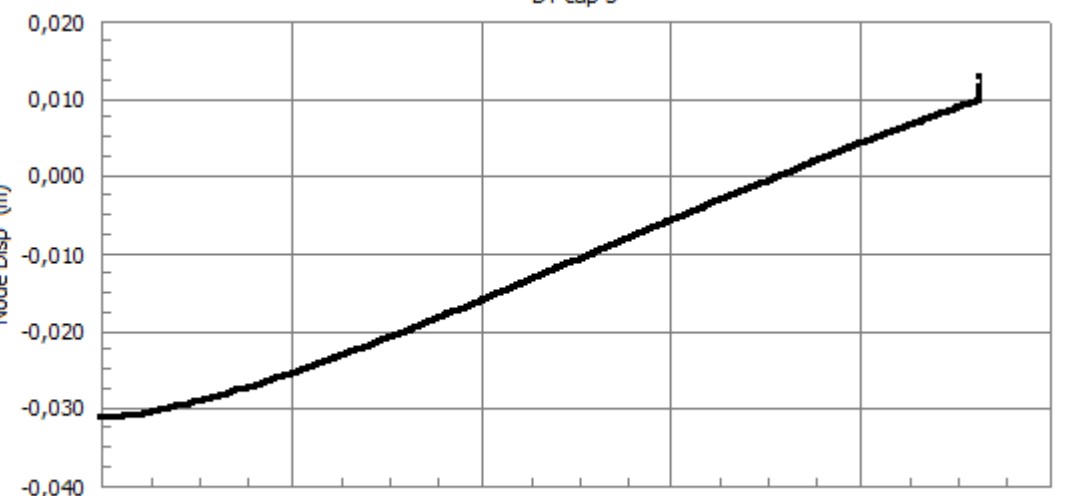
11



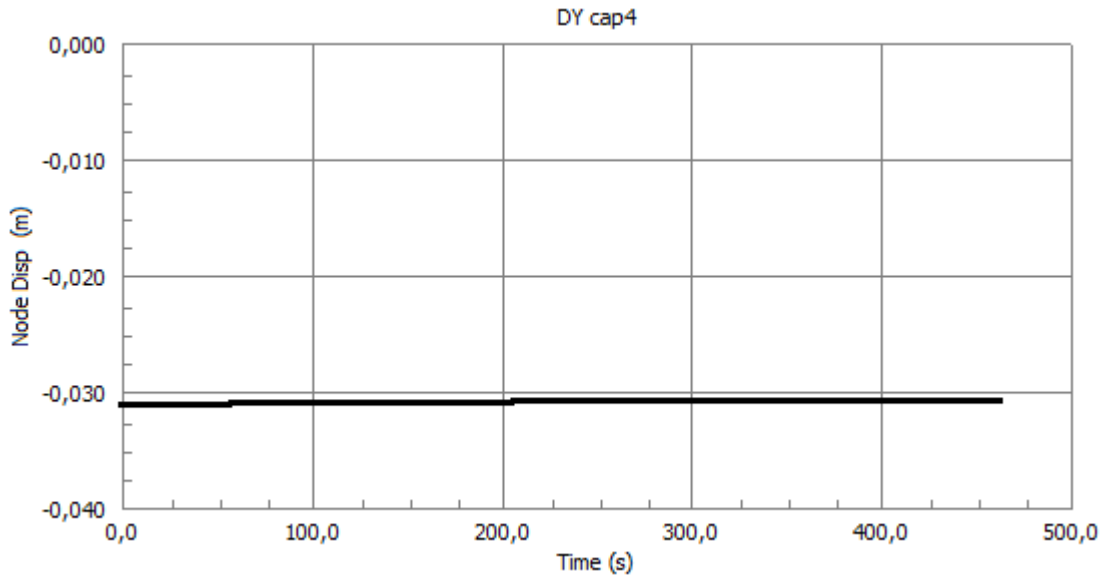
12



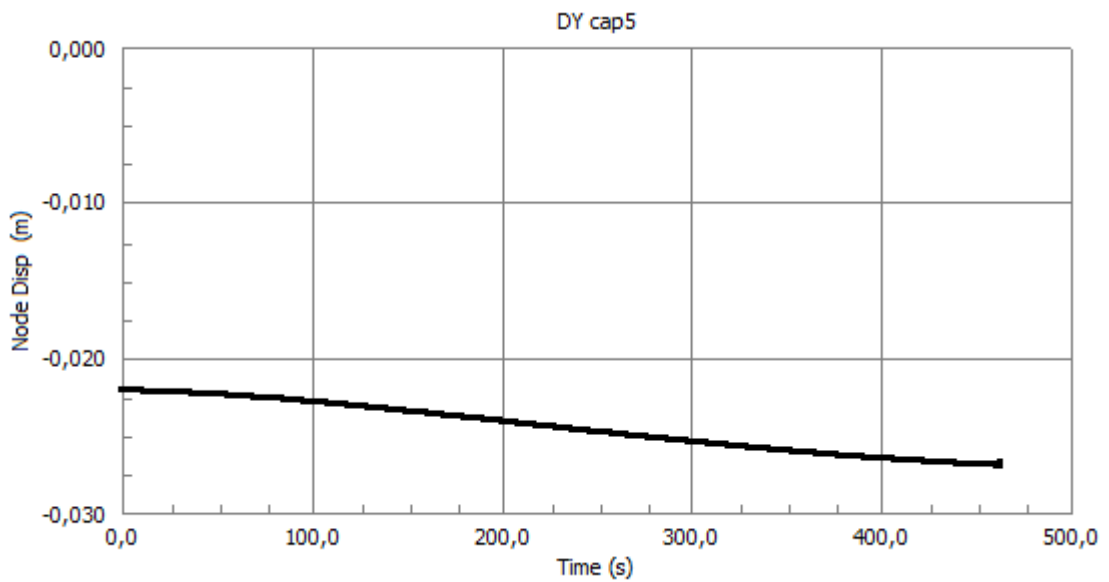
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico														
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 13: DY cap1</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,0008</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>-0,0007</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>-0,0006</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>-0,0005</td></tr> <tr><td>460,0</td><td>-0,0070</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,0008	100,0	-0,0008	200,0	-0,0007	300,0	-0,0006	400,0	-0,0005	460,0	-0,0070
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,0008														
100,0	-0,0008														
200,0	-0,0007														
300,0	-0,0006														
400,0	-0,0005														
460,0	-0,0070														
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 14: DY cap2</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,0250</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,0200</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>-0,0150</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>-0,0100</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>-0,0050</td></tr> <tr><td>460,0</td><td>0,0080</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,0250	100,0	-0,0200	200,0	-0,0150	300,0	-0,0100	400,0	-0,0050	460,0	0,0080
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,0250														
100,0	-0,0200														
200,0	-0,0150														
300,0	-0,0100														
400,0	-0,0050														
460,0	0,0080														
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <table border="1"> <caption>Data for Node 15: DY cap 3</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>-0,0320</td></tr> <tr><td>100,0</td><td>-0,0280</td></tr> <tr><td>200,0</td><td>-0,0240</td></tr> <tr><td>300,0</td><td>-0,0200</td></tr> <tr><td>400,0</td><td>-0,0160</td></tr> <tr><td>460,0</td><td>0,0120</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0,0	-0,0320	100,0	-0,0280	200,0	-0,0240	300,0	-0,0200	400,0	-0,0160	460,0	0,0120
Time (s)	Node Disp (m)														
0,0	-0,0320														
100,0	-0,0280														
200,0	-0,0240														
300,0	-0,0200														
400,0	-0,0160														
460,0	0,0120														

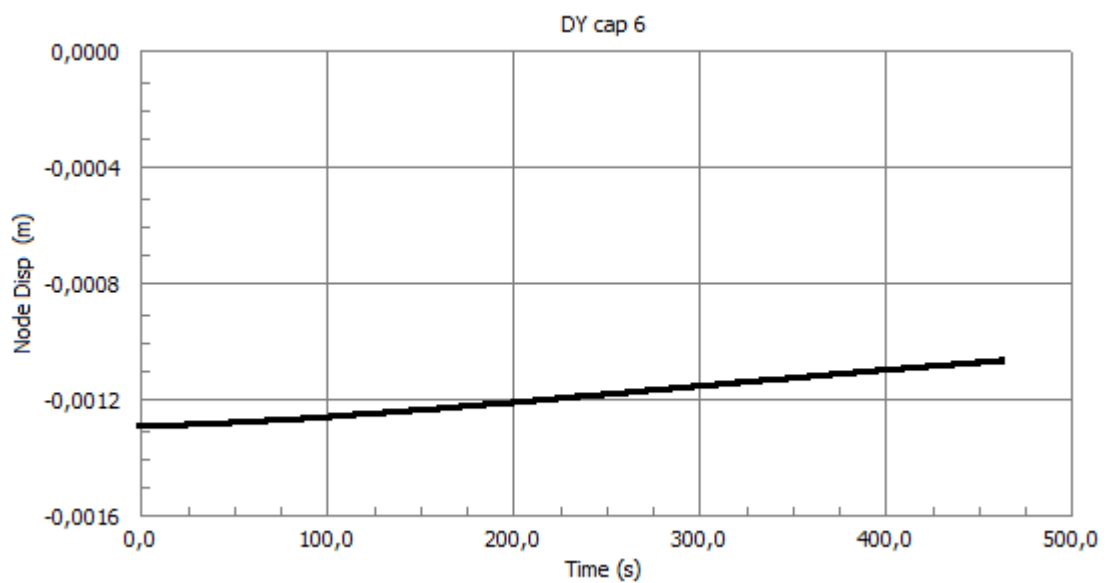
16



17

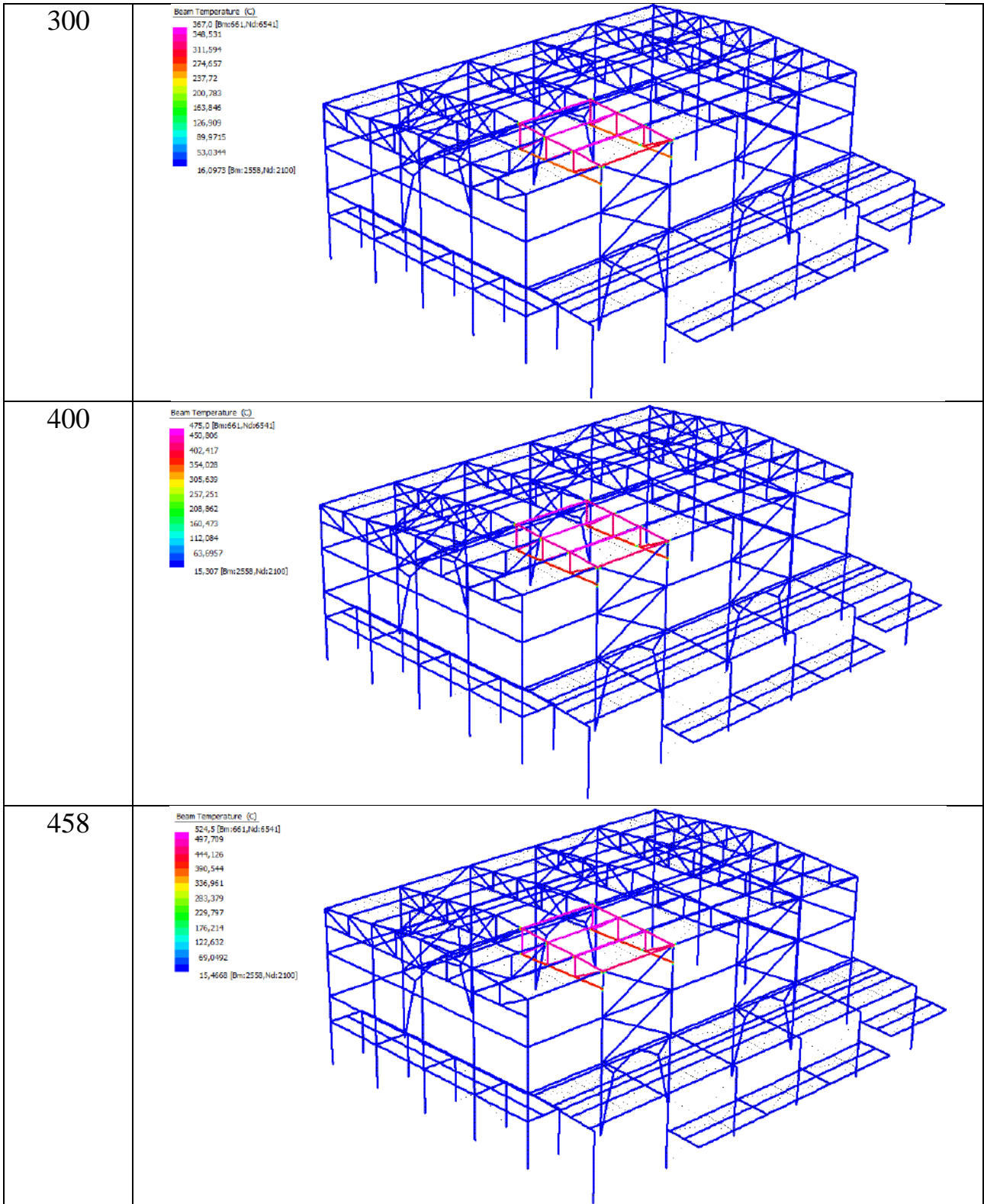


18



SCENARIO 2.1

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	
100	
200	

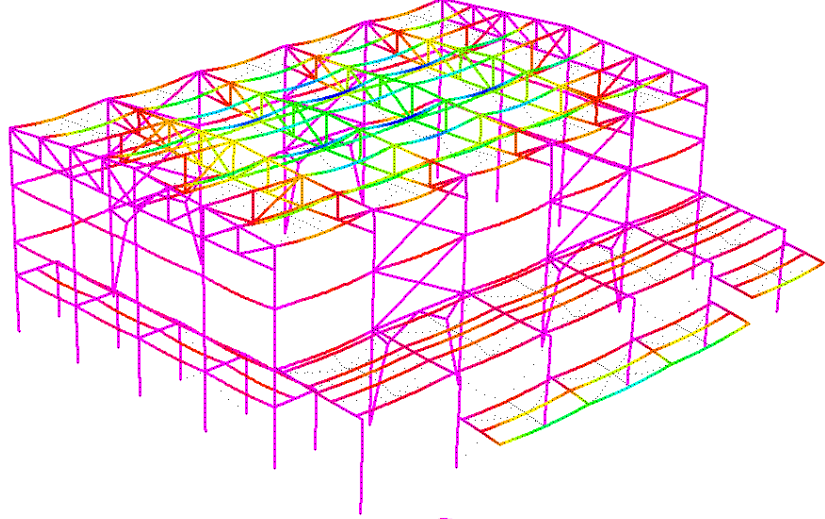
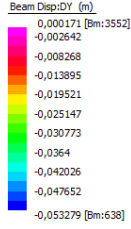


Analisi Meccanica

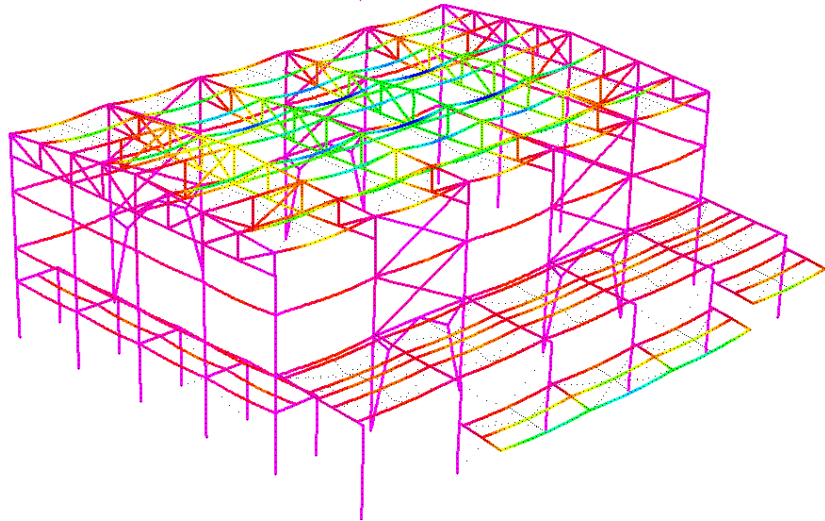
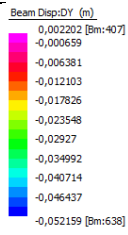
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

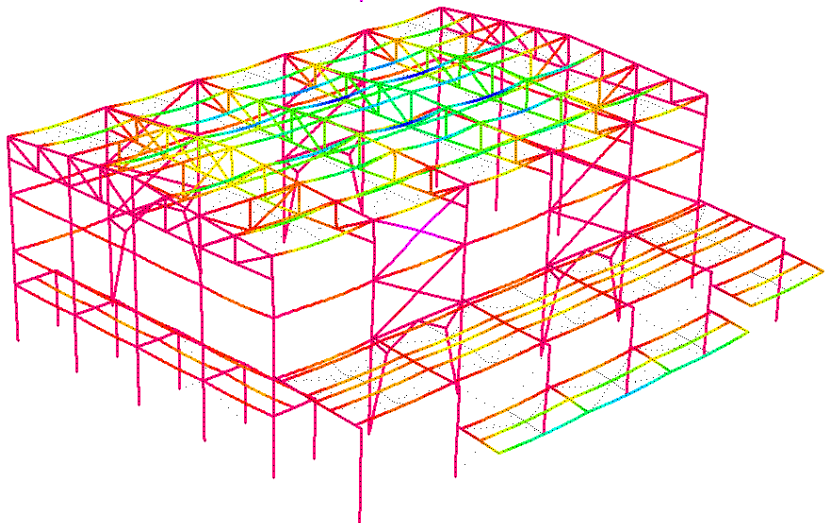
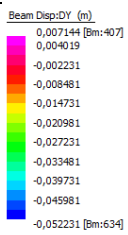
1



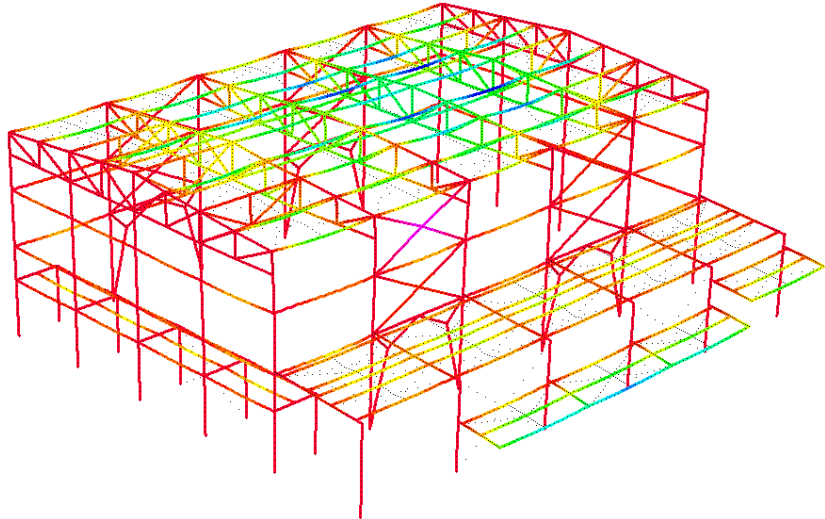
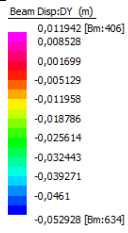
100



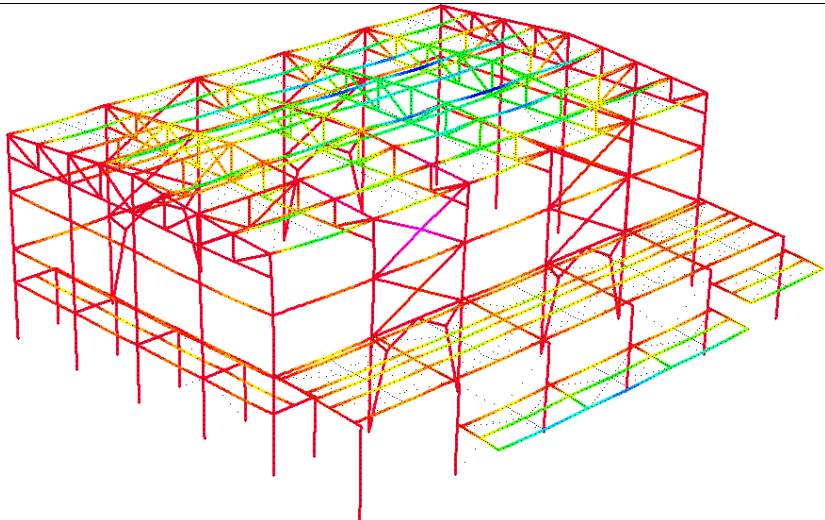
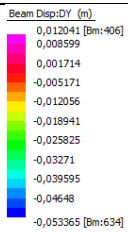
200



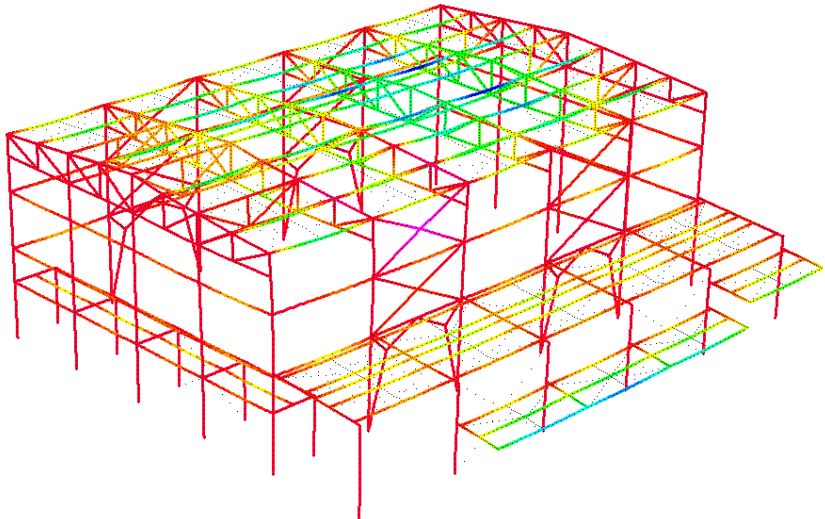
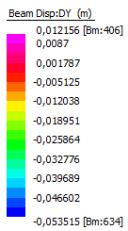
300



400



458

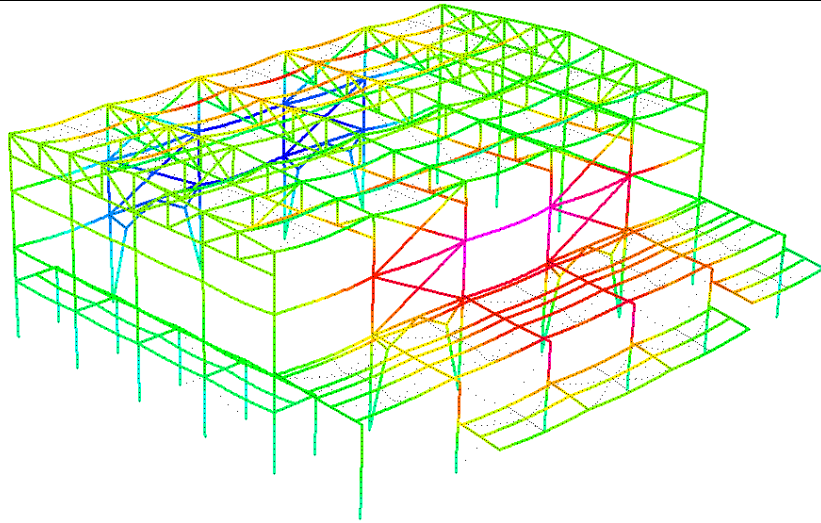
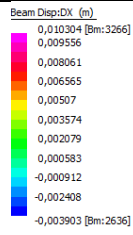


Analisi Meccanica

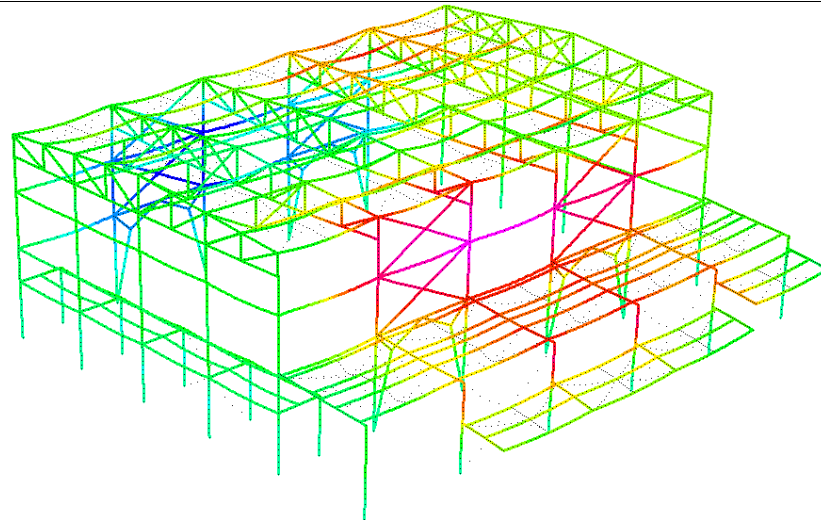
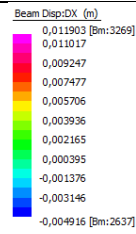
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

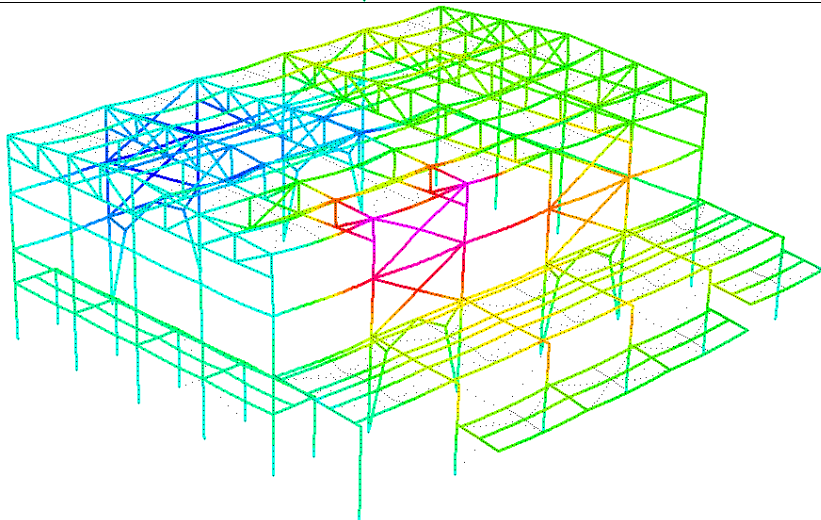
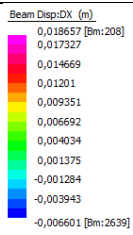
1

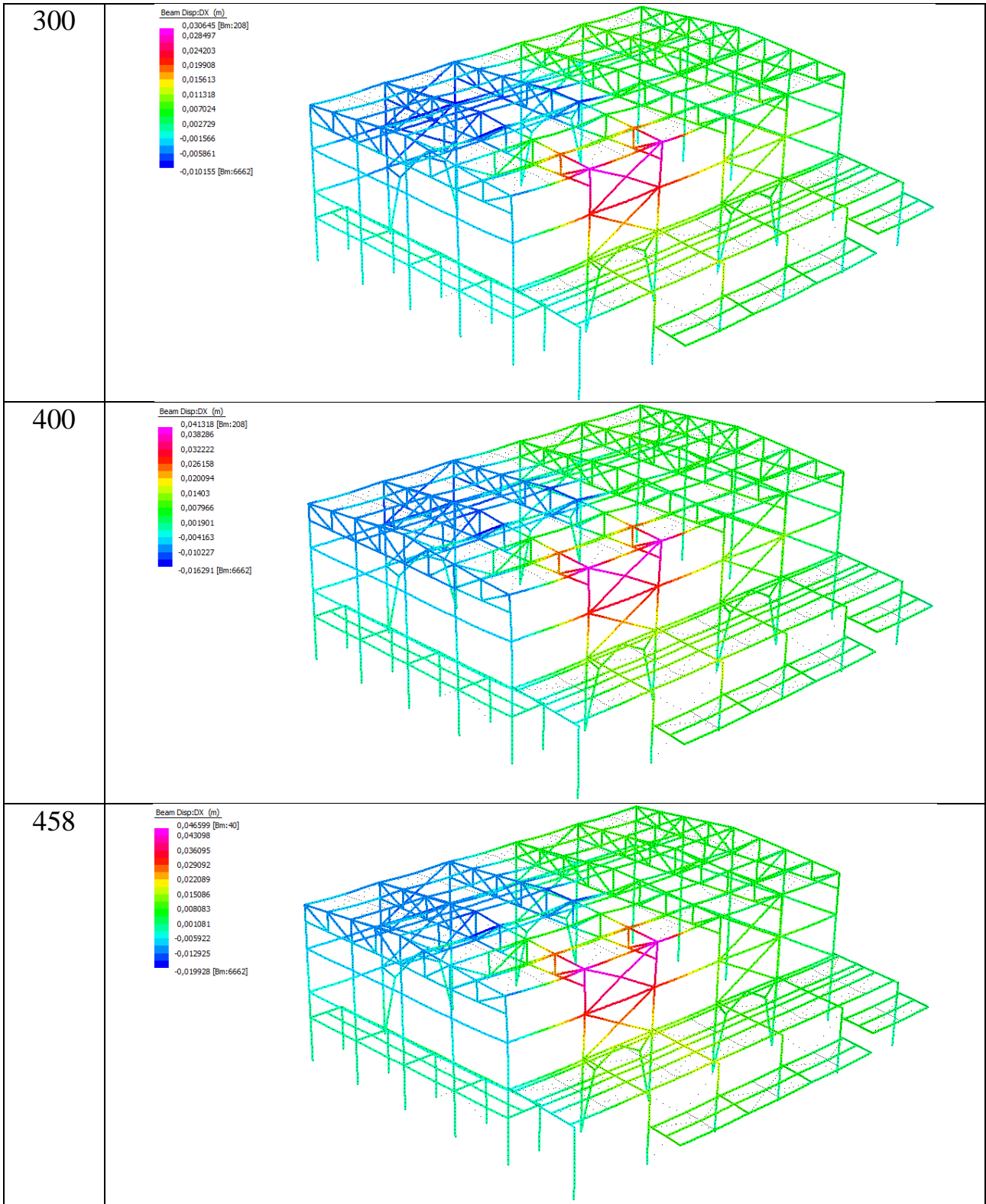


100



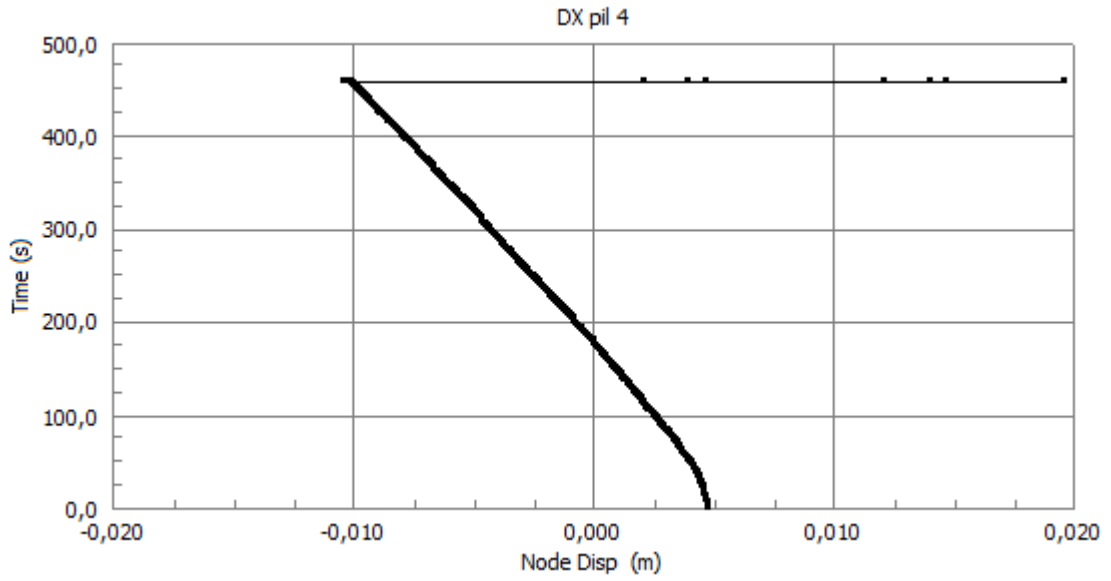
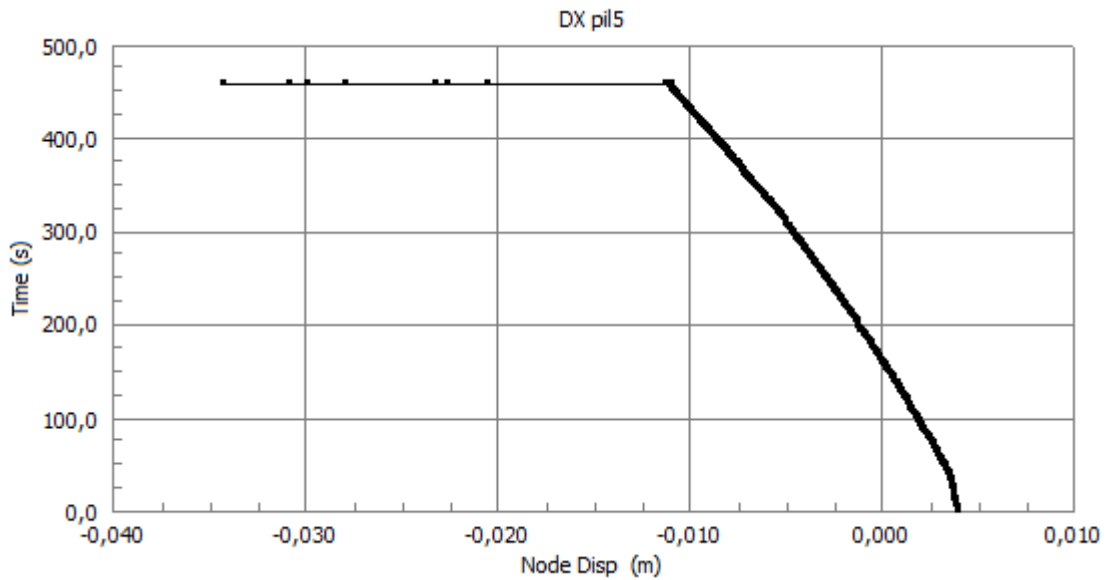
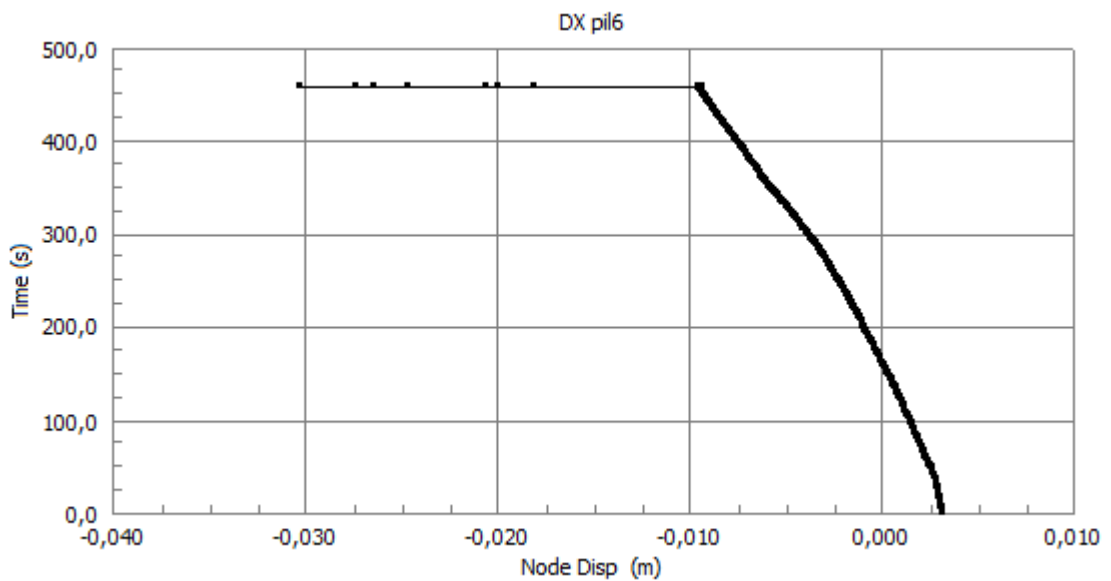
200





Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

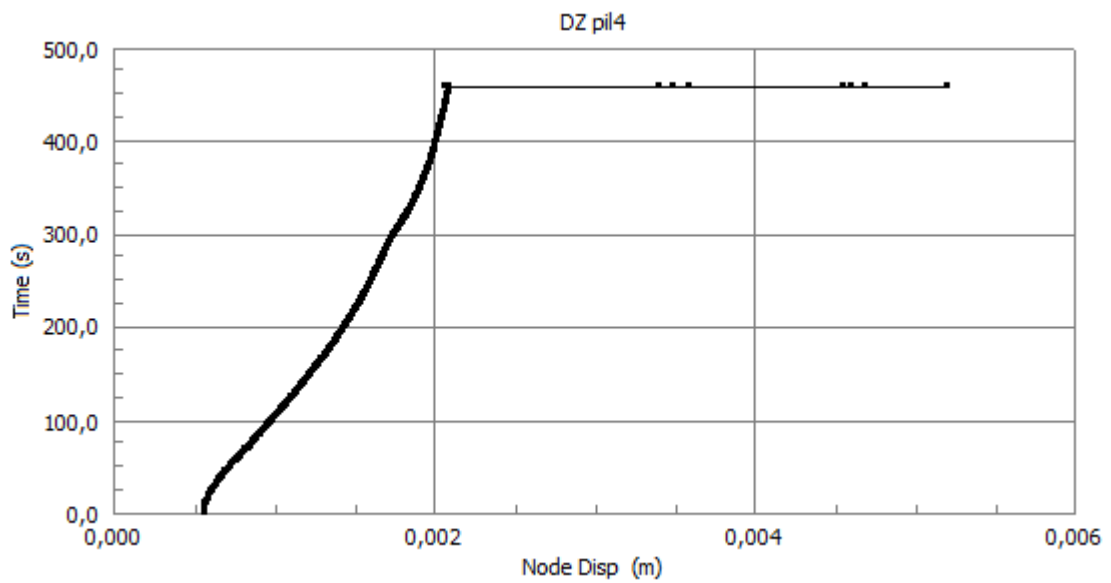
Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>

4**5****6**

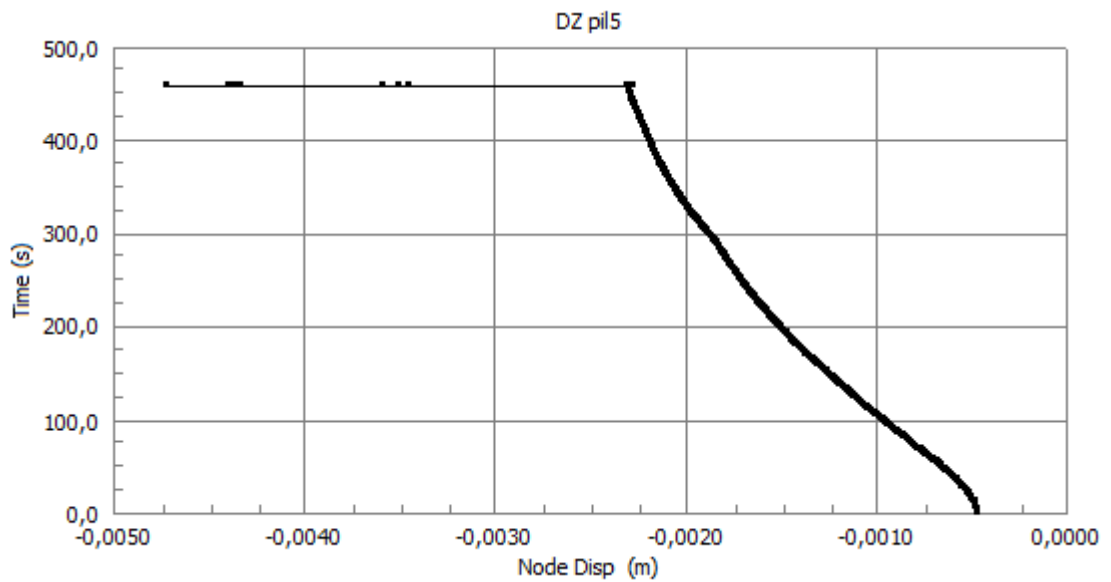
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p>

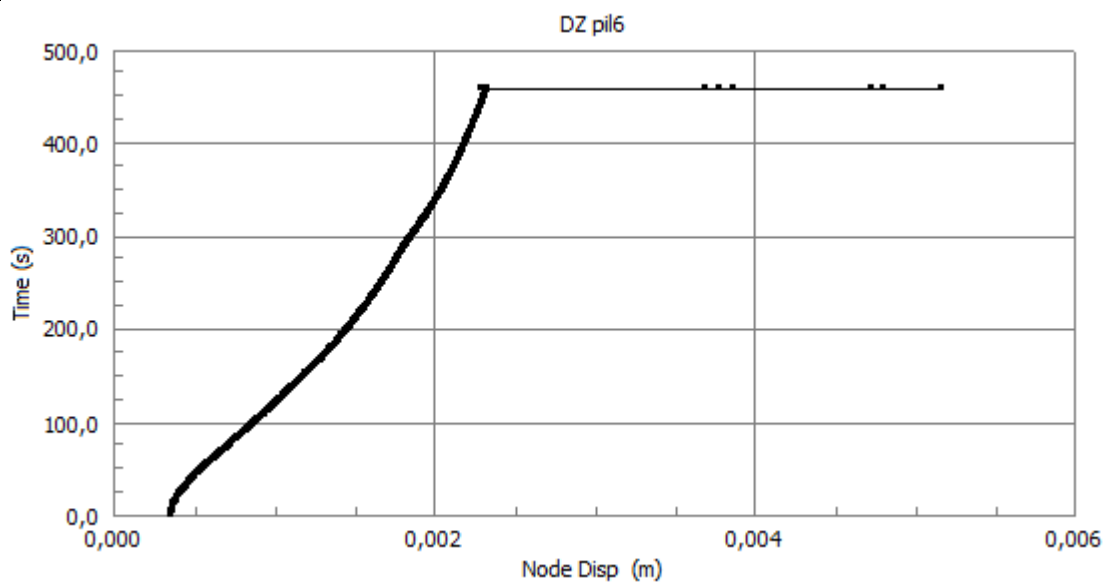
10



11



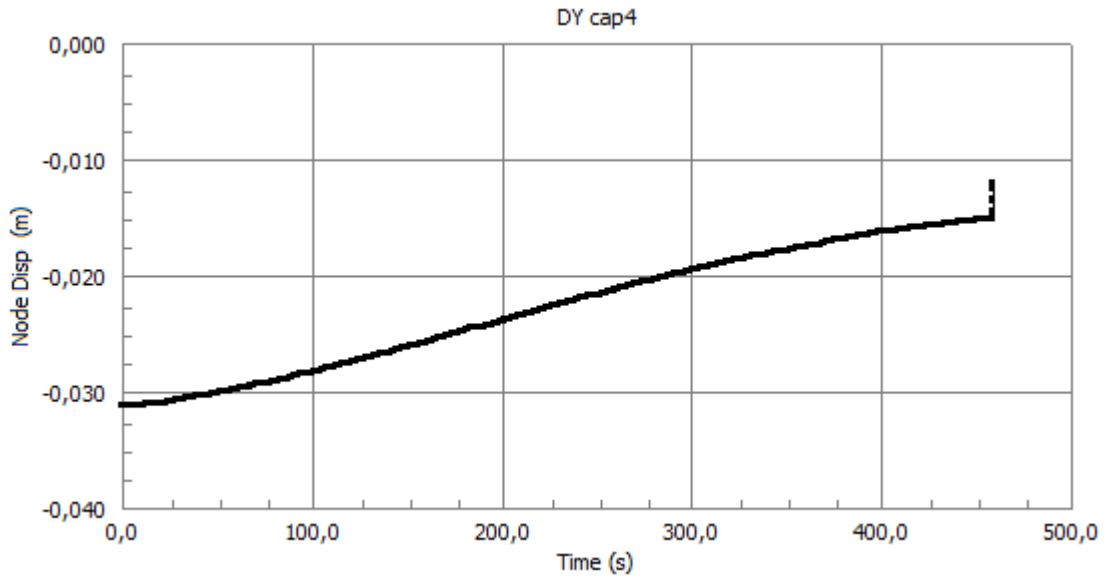
12



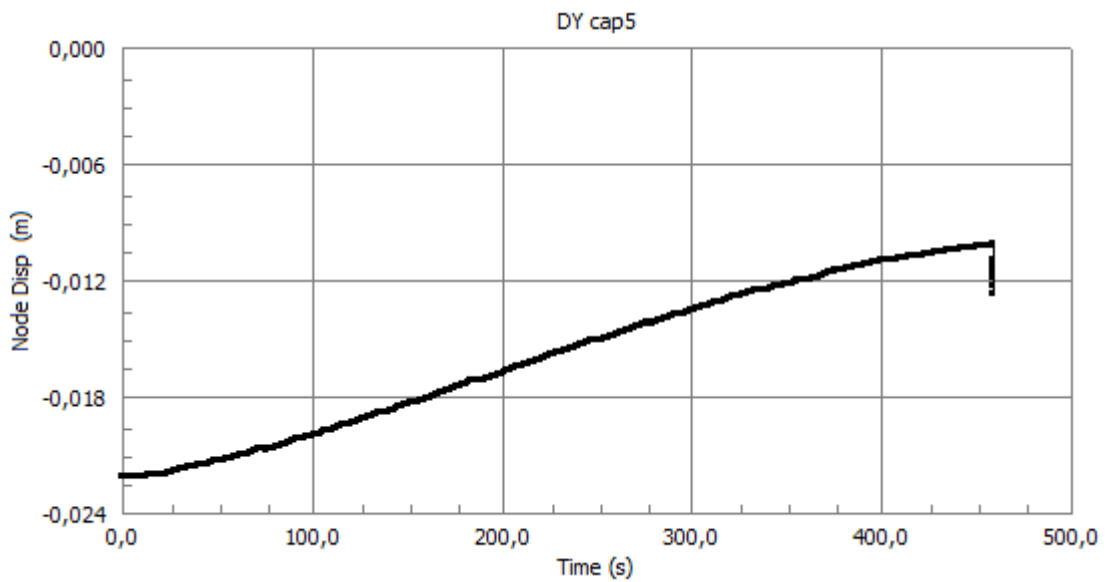
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico
13	<p style="text-align: center;">DY cap1</p> <p>The graph for Node 13 shows a vertical displacement that starts at approximately -0,0008 m at 0 seconds and remains nearly constant, ending at approximately -0,0008 m at 500 seconds. The y-axis ranges from 0,0000 to -0,0010 m, and the x-axis ranges from 0,0 to 500,0 s.</p>
14	<p style="text-align: center;">DY cap2</p> <p>The graph for Node 14 shows a vertical displacement that starts at approximately -0,025 m at 0 seconds and gradually decreases to approximately -0,028 m at 500 seconds. The y-axis ranges from 0,000 to -0,030 m, and the x-axis ranges from 0,0 to 500,0 s.</p>
15	<p style="text-align: center;">DY cap 3</p> <p>The graph for Node 15 shows a vertical displacement that starts at approximately -0,032 m at 0 seconds and remains nearly constant, ending at approximately -0,032 m at 500 seconds. The y-axis ranges from 0,000 to -0,040 m, and the x-axis ranges from 0,0 to 500,0 s.</p>

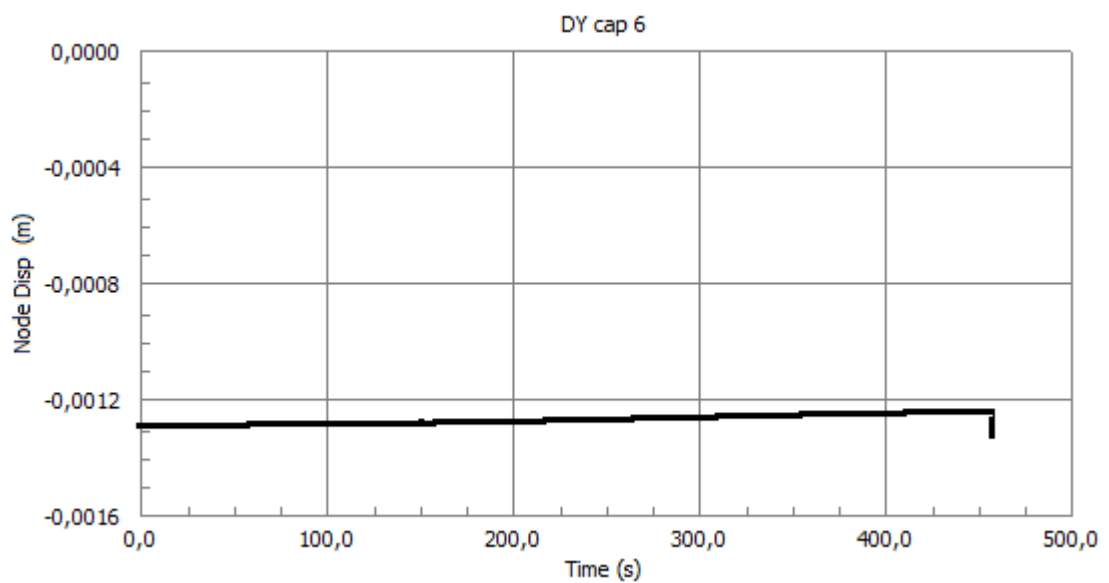
16



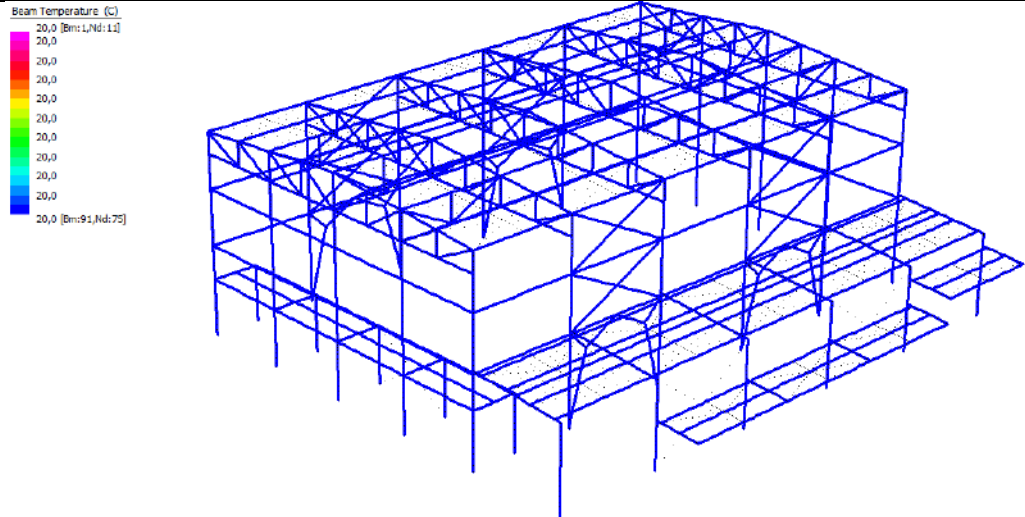
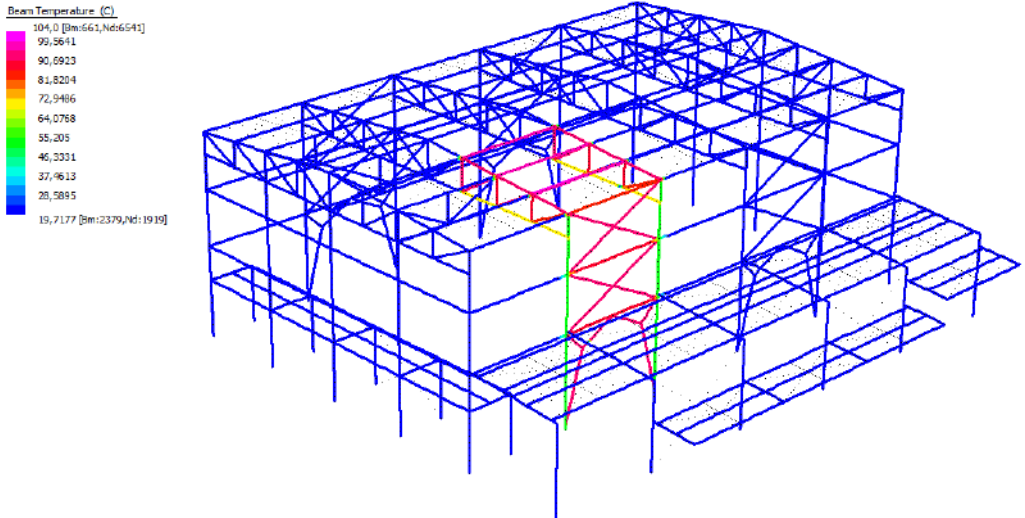
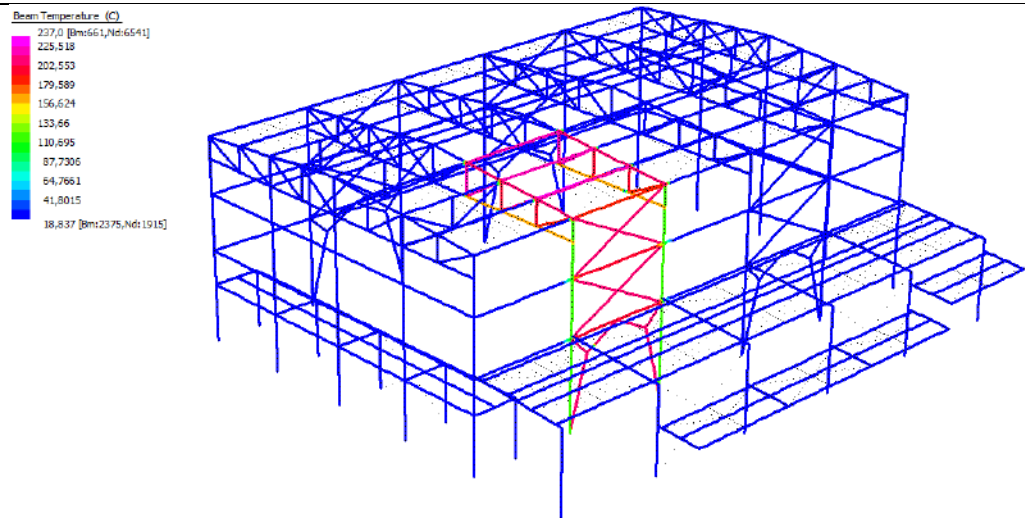
17

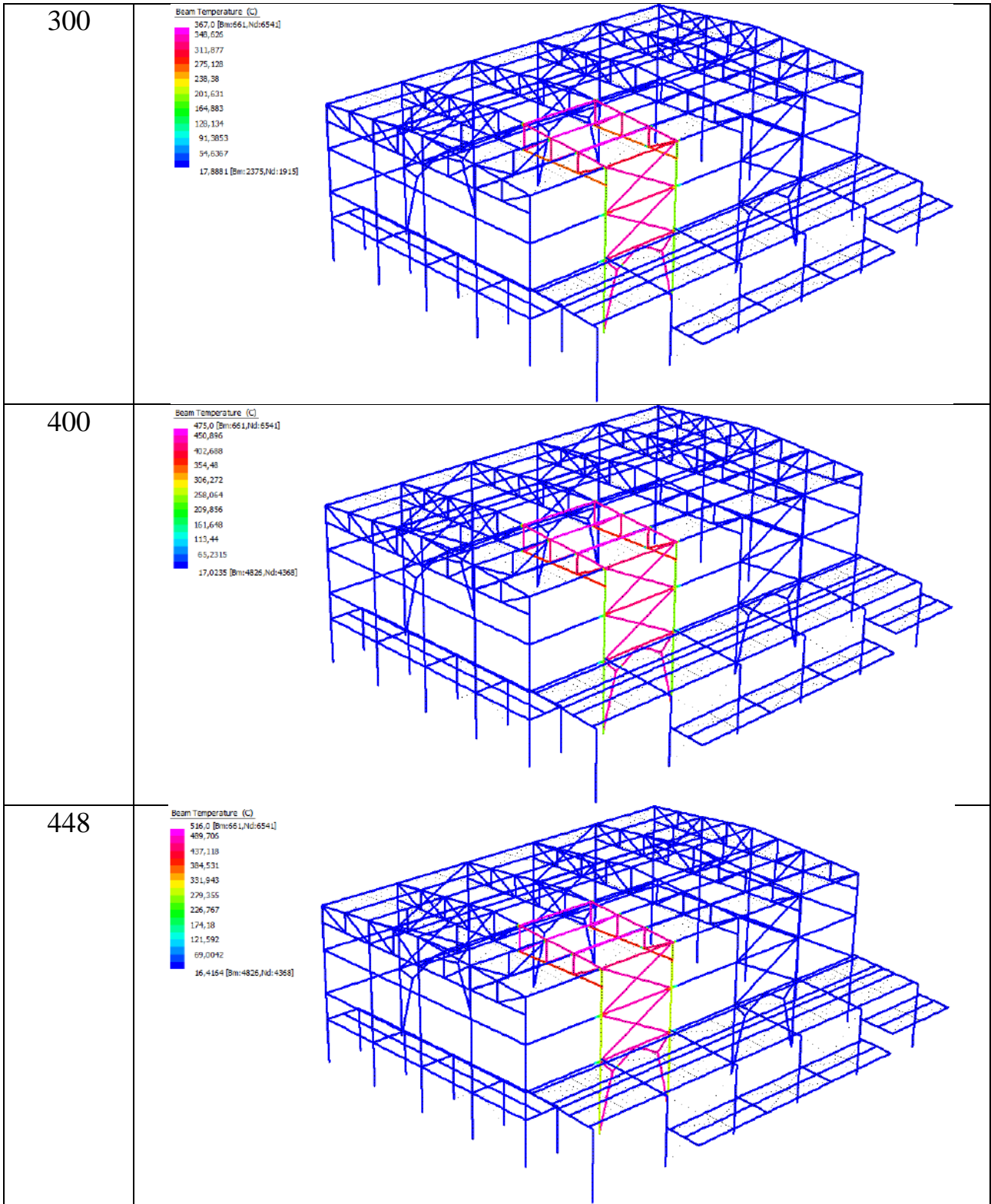


18

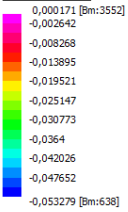
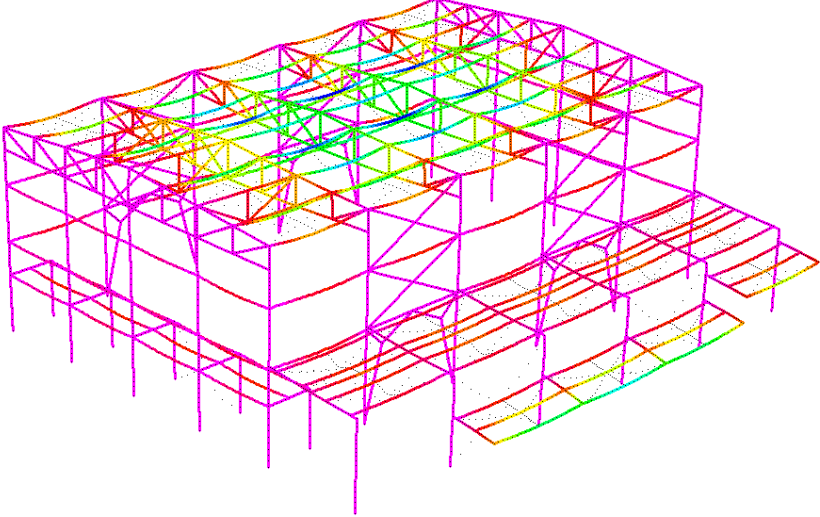
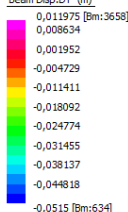
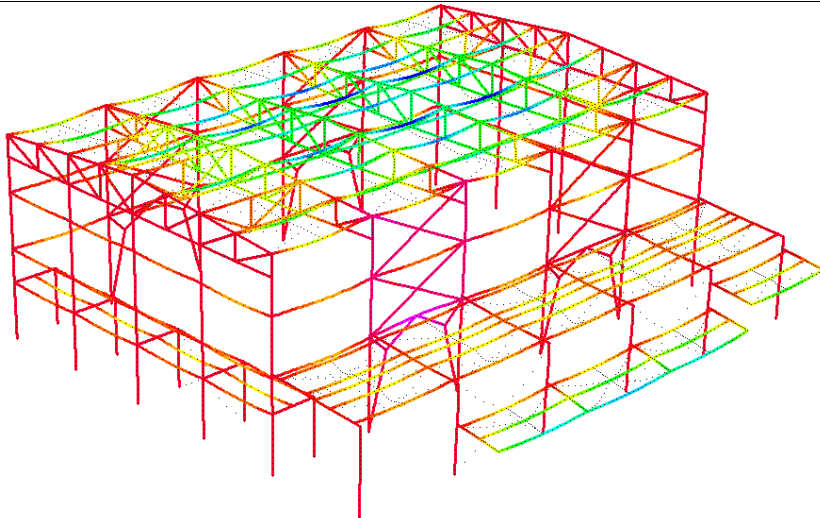
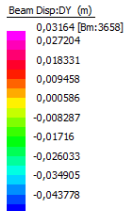
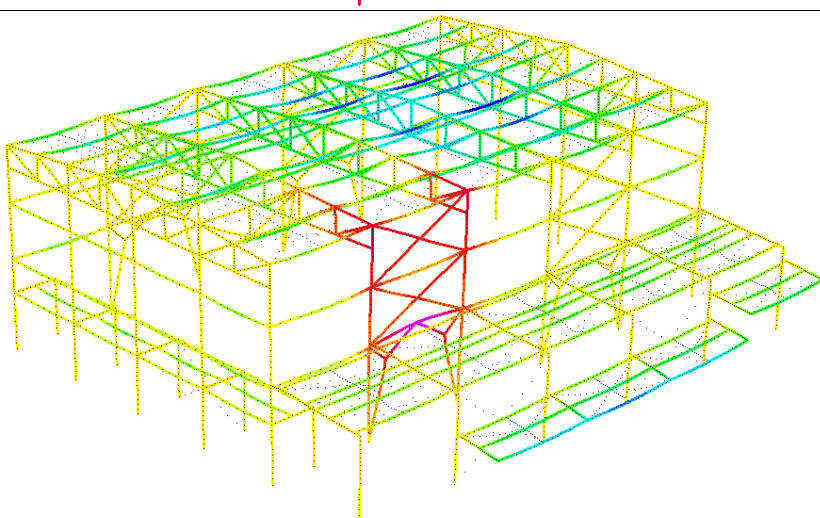


SCENARIO 2.2

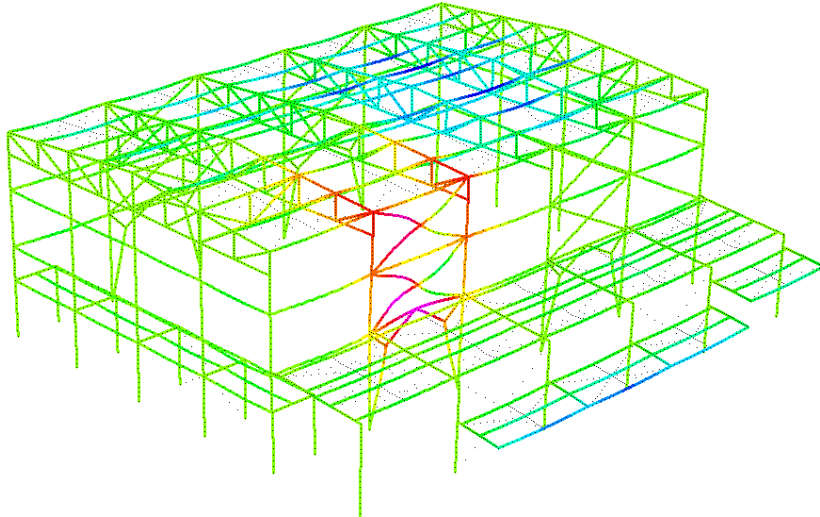
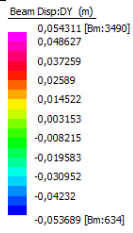
Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>20,0 [Bm:1,Nd:13]</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0 [Bm:91,Nd:75]</p>
100	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>104,0 [Bm:661,Nd:6541]</p> <p>99,5641</p> <p>90,6923</p> <p>81,8204</p> <p>72,9486</p> <p>64,0768</p> <p>55,205</p> <p>46,3331</p> <p>37,4613</p> <p>28,5895</p> <p>19,7177 [Bm:2379,Nd:1919]</p>
200	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>237,0 [Bm:661,Nd:6541]</p> <p>225,518</p> <p>202,553</p> <p>179,589</p> <p>156,624</p> <p>133,66</p> <p>110,695</p> <p>87,7306</p> <p>64,7651</p> <p>41,8015</p> <p>38,837 [Bm:2375,Nd:1915]</p>



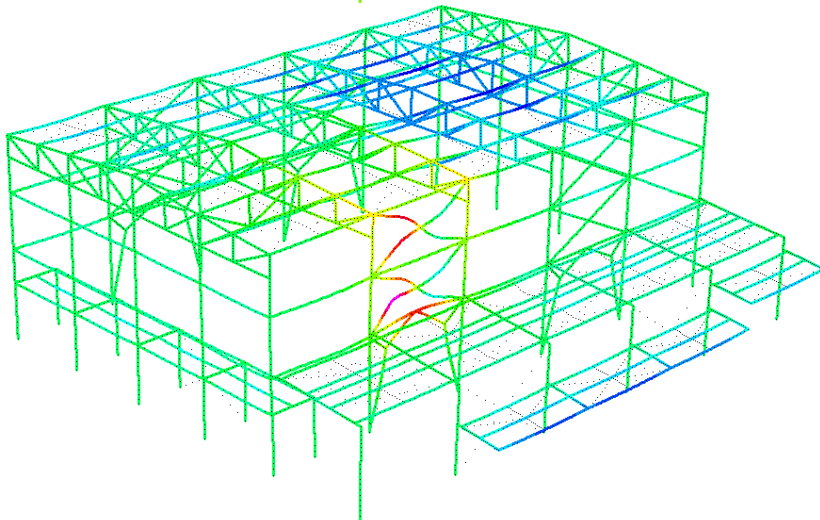
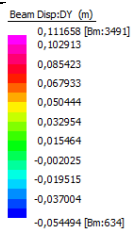
Analisi Meccanica

Tempo s	Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y	
1	<p>Beam Disp: DY (m)</p>  <p>0,000171 [Bm:3552] -0,002642 -0,008268 -0,013895 -0,019521 -0,025147 -0,030773 -0,0364 -0,042026 -0,047652 -0,053279 [Bm:638]</p>	
100	<p>Beam Disp: DY (m)</p>  <p>0,011975 [Bm:3658] 0,008634 0,001952 -0,004729 -0,011411 -0,018092 -0,024774 -0,031455 -0,038137 -0,044818 -0,0515 [Bm:634]</p>	
200	<p>Beam Disp: DY (m)</p>  <p>0,03164 [Bm:3658] 0,027204 0,018331 0,009458 0,000586 -0,008287 -0,01716 -0,026033 -0,034905 -0,043778 -0,052651 [Bm:634]</p>	

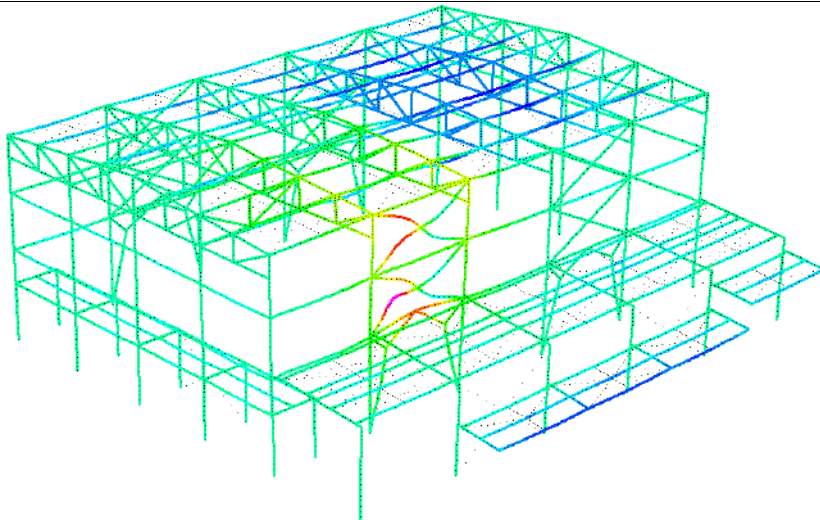
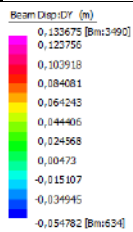
300



400



448

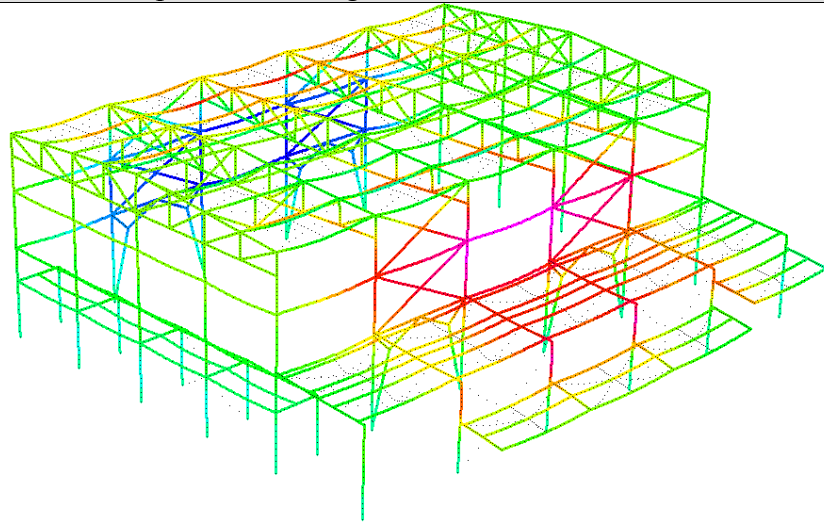
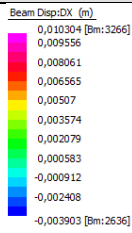


Analisi Meccanica

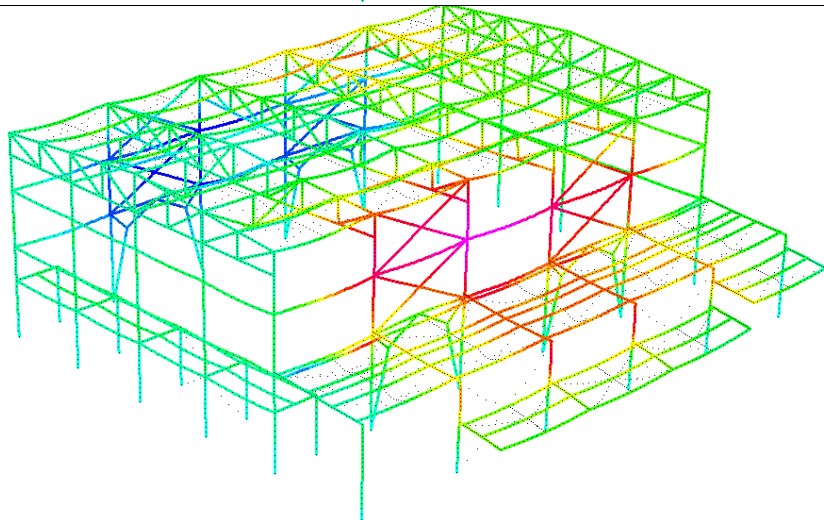
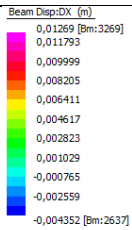
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

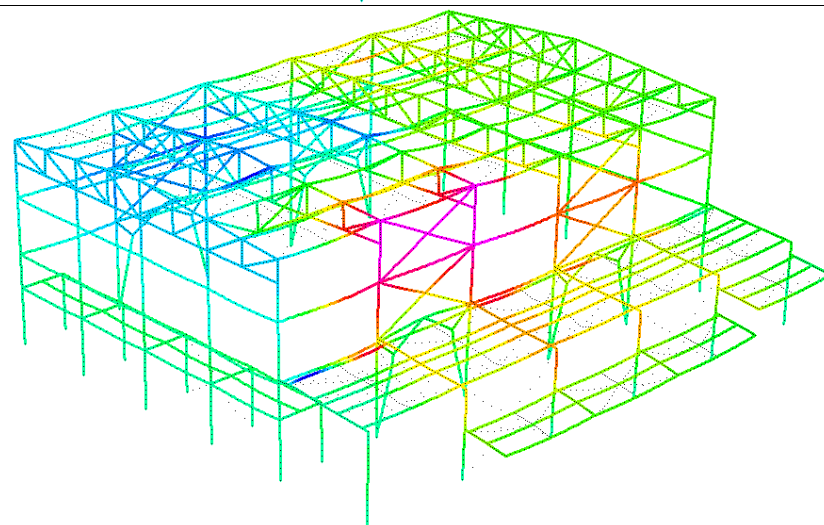
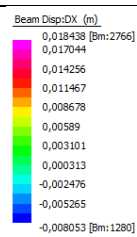
1



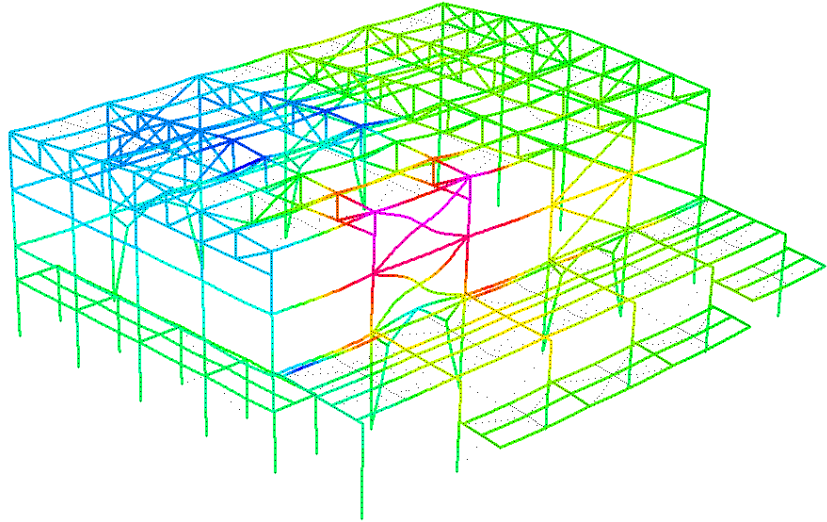
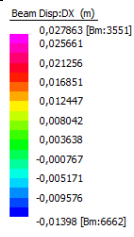
100



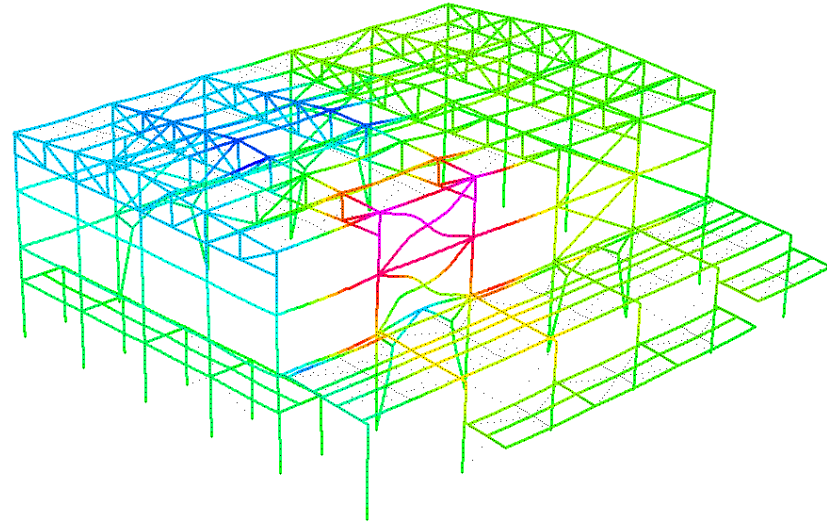
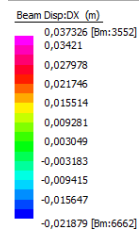
200



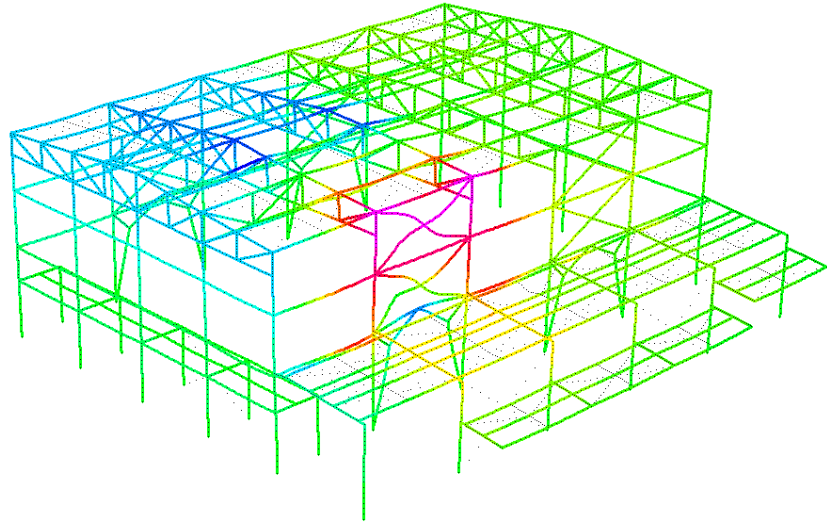
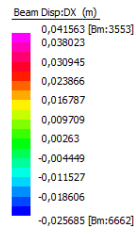
300



400



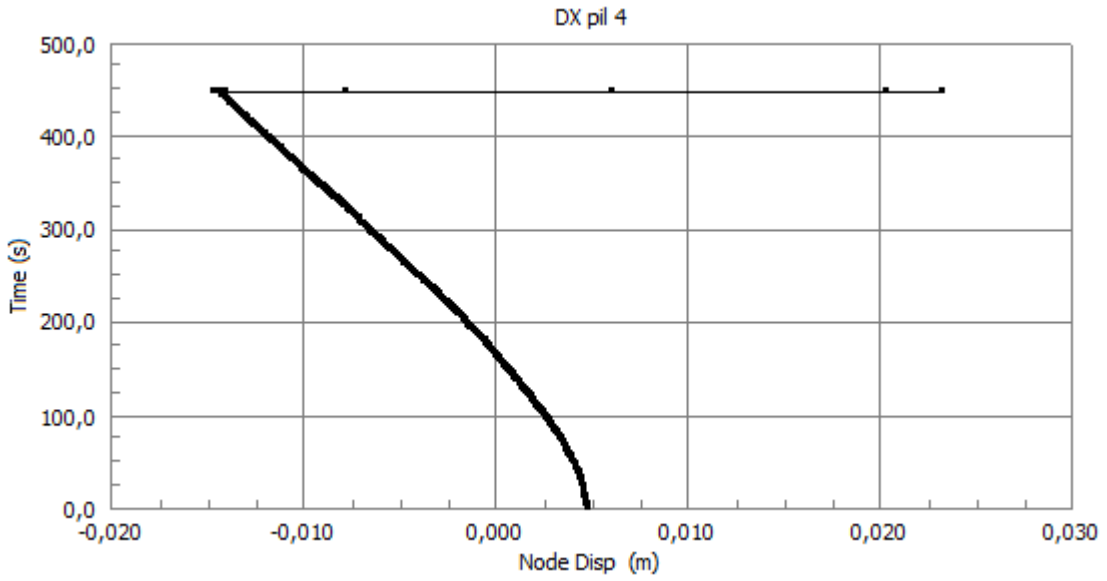
448



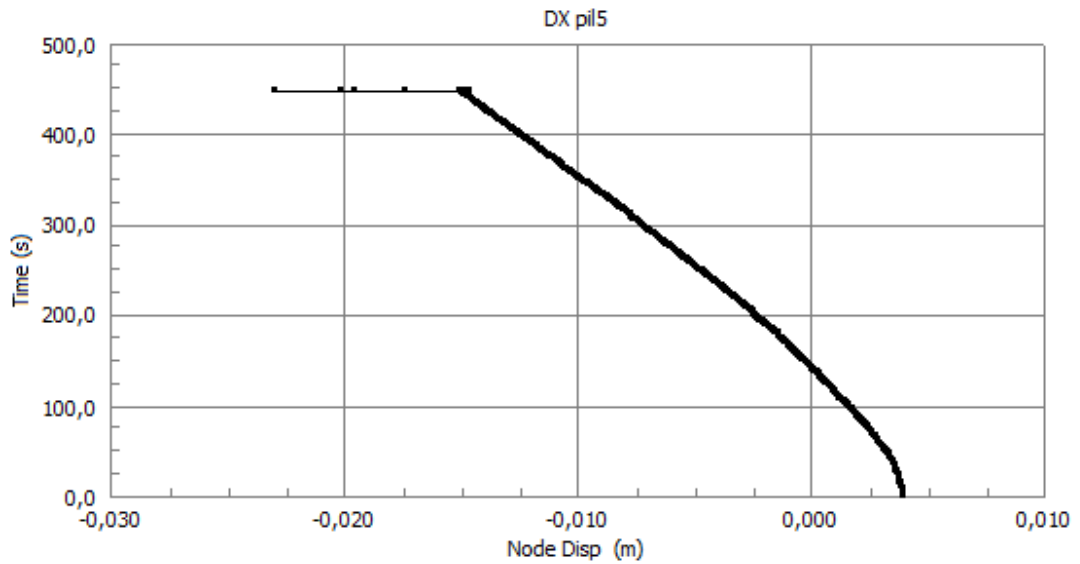
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
1	<p style="text-align: center;">DX pil1</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
2	<p style="text-align: center;">DX pil2</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
3	<p style="text-align: center;">DX pil3</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>

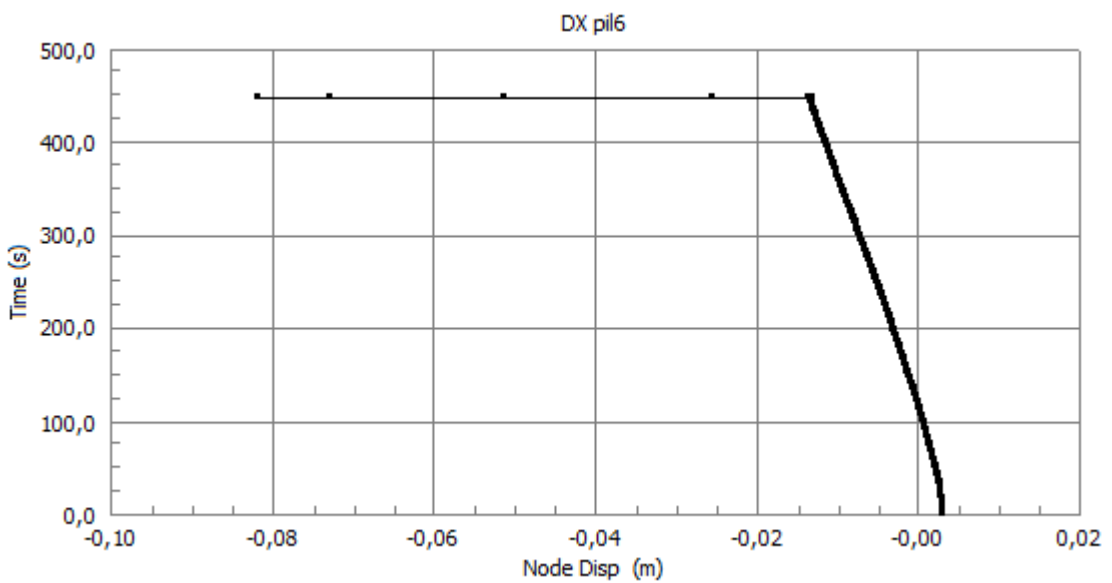
4



5



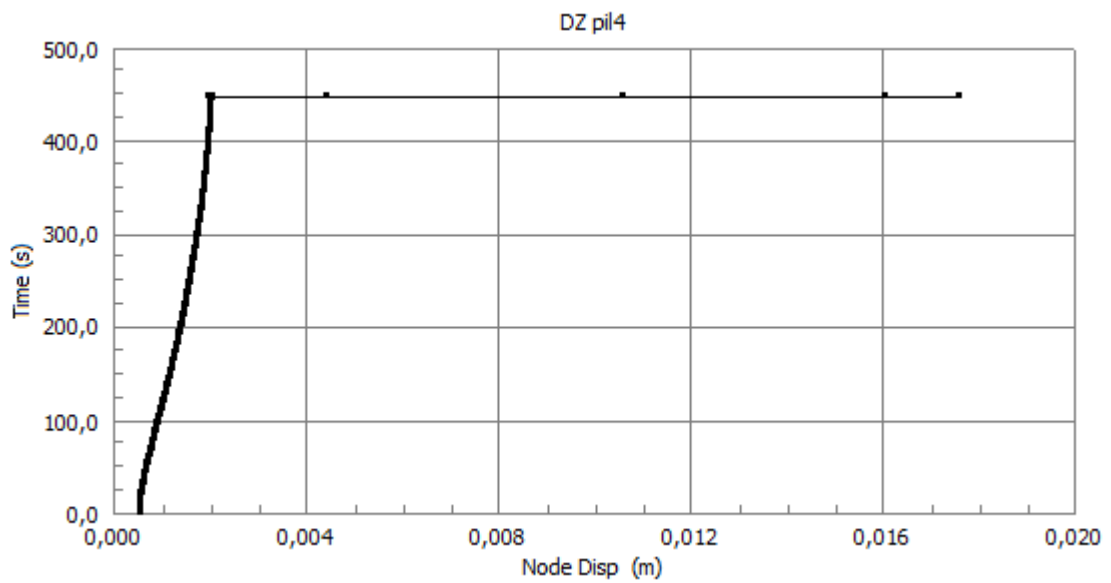
6



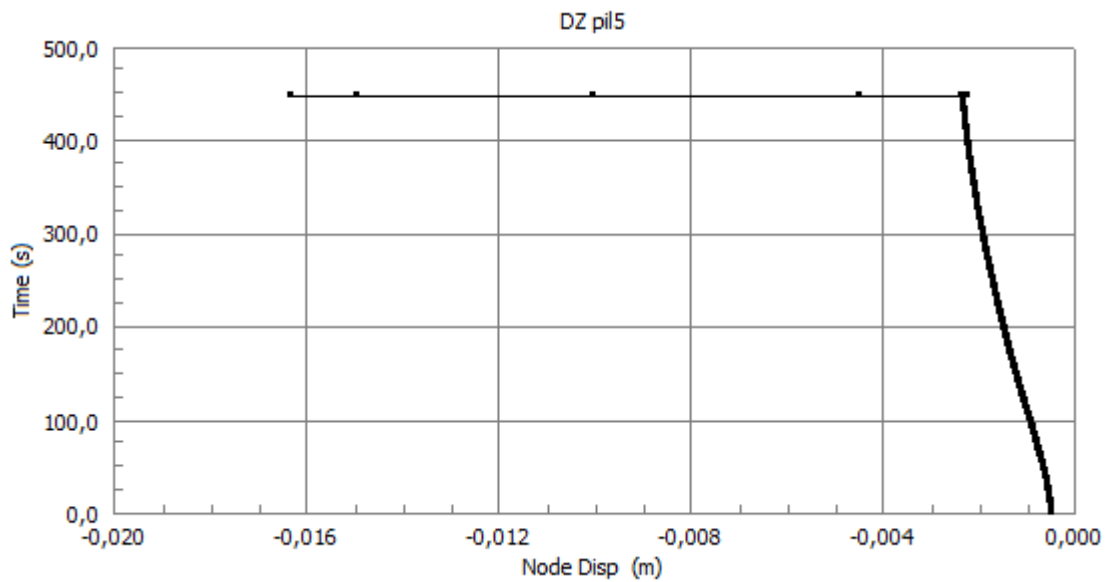
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p> <p>Time (s)</p> <p>Node Disp (m)</p>

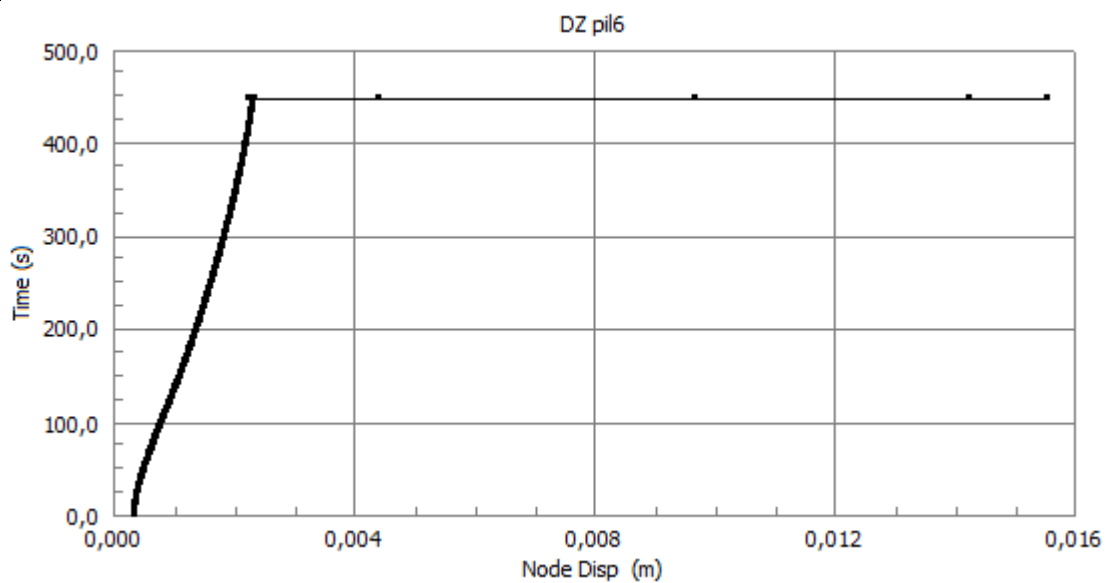
10



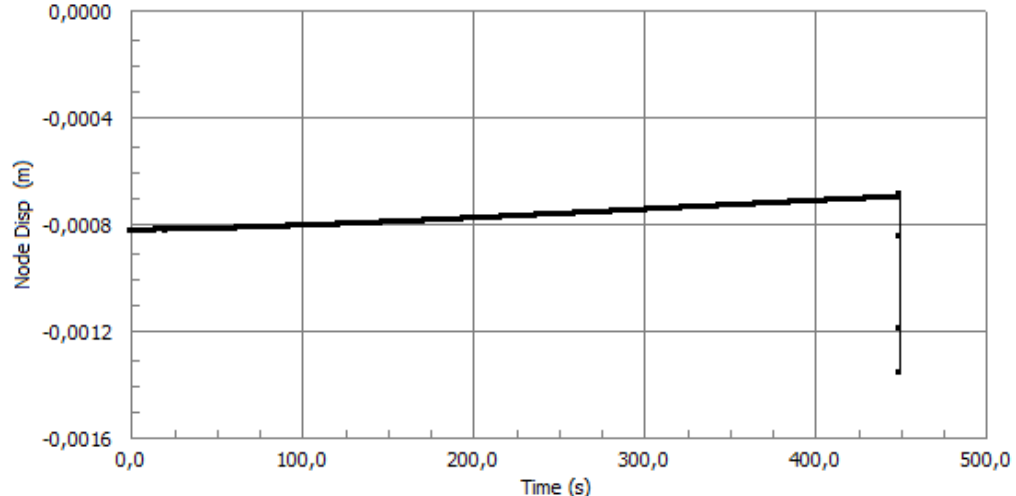
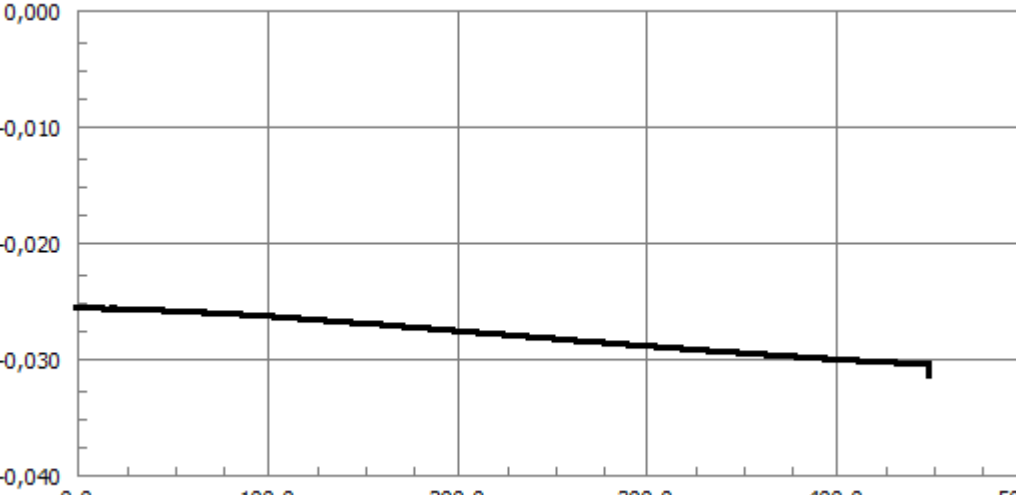
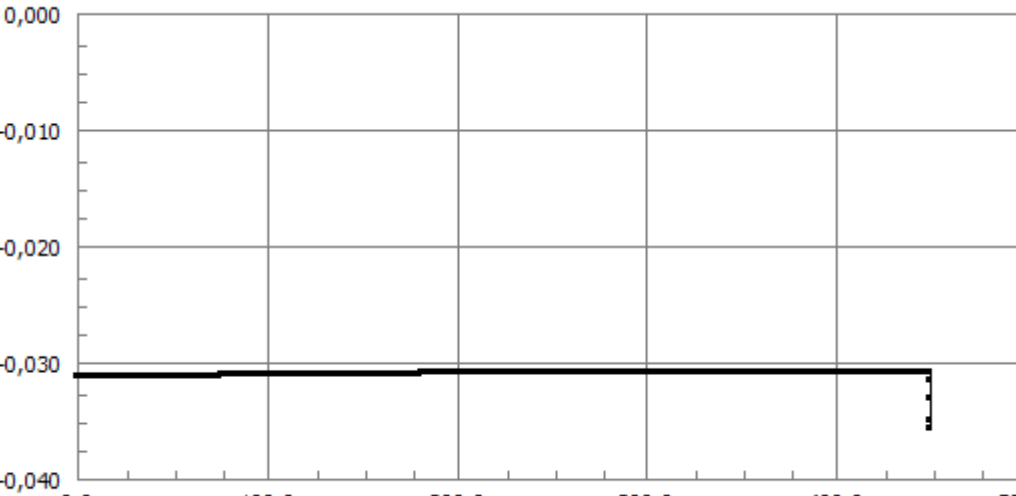
11



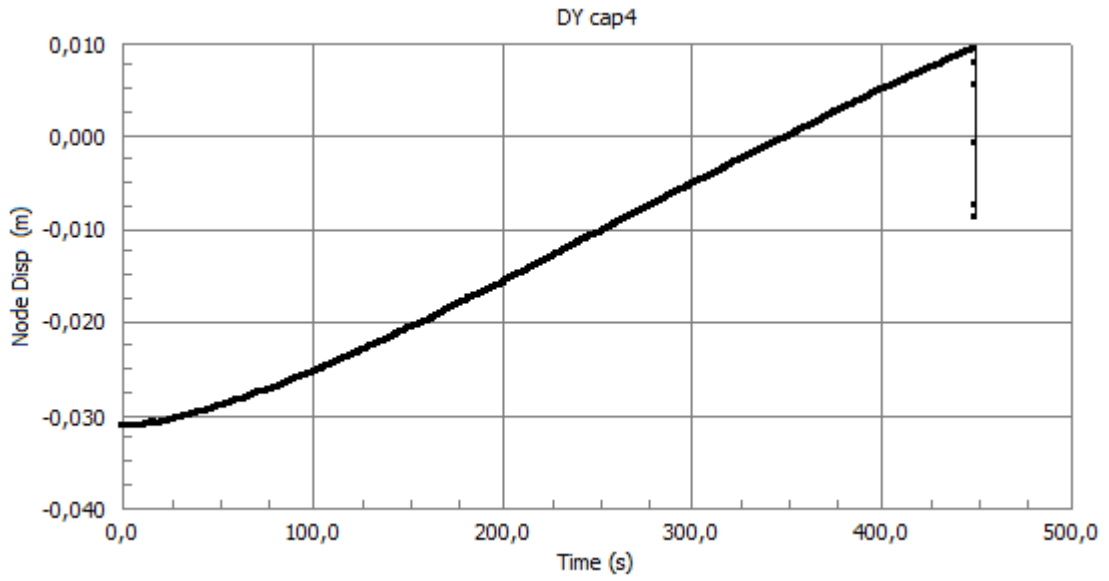
12



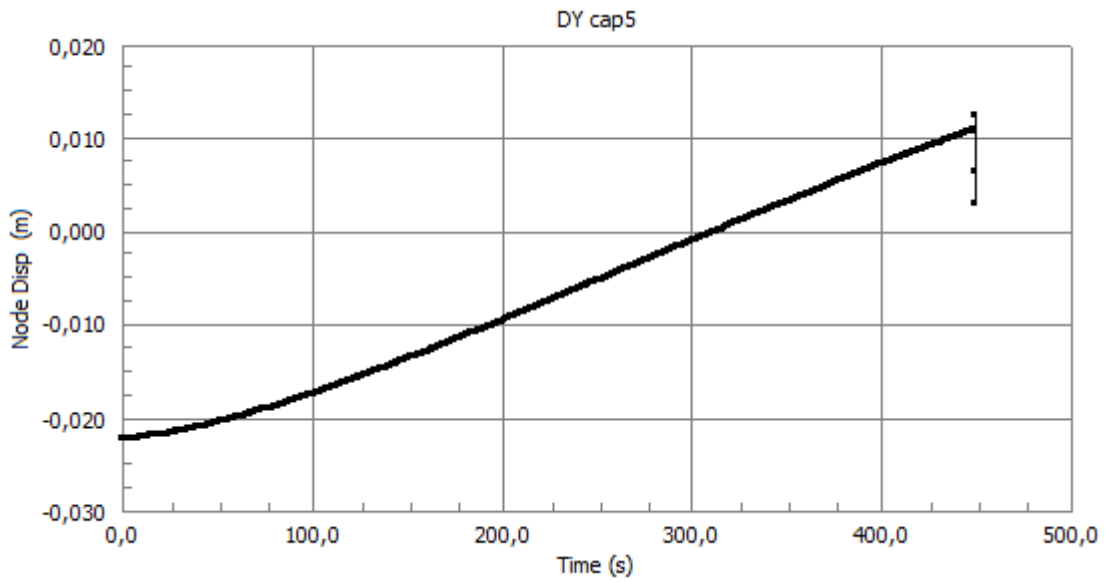
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>

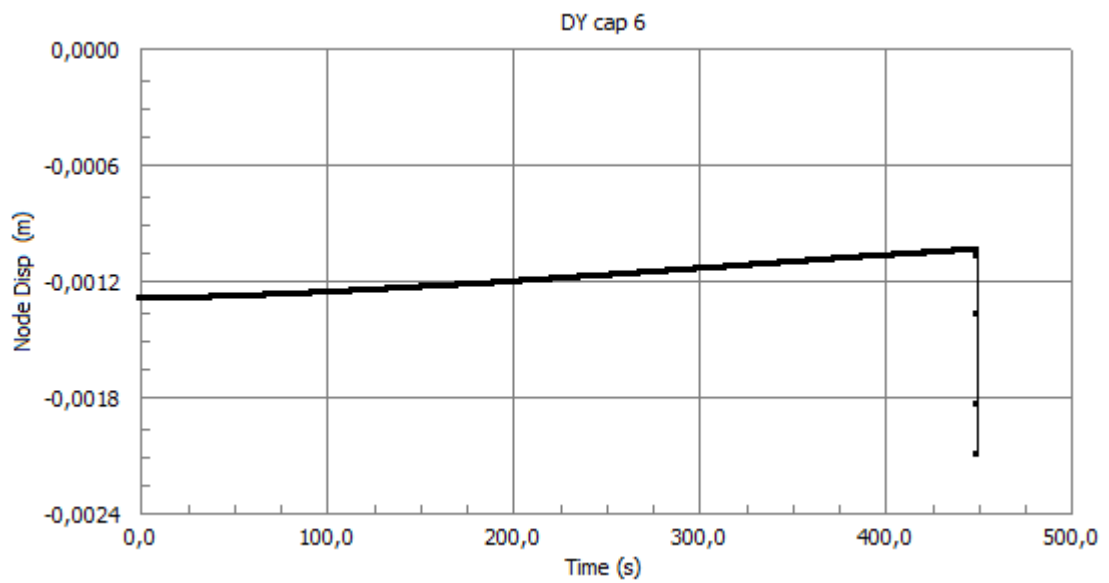
16



17

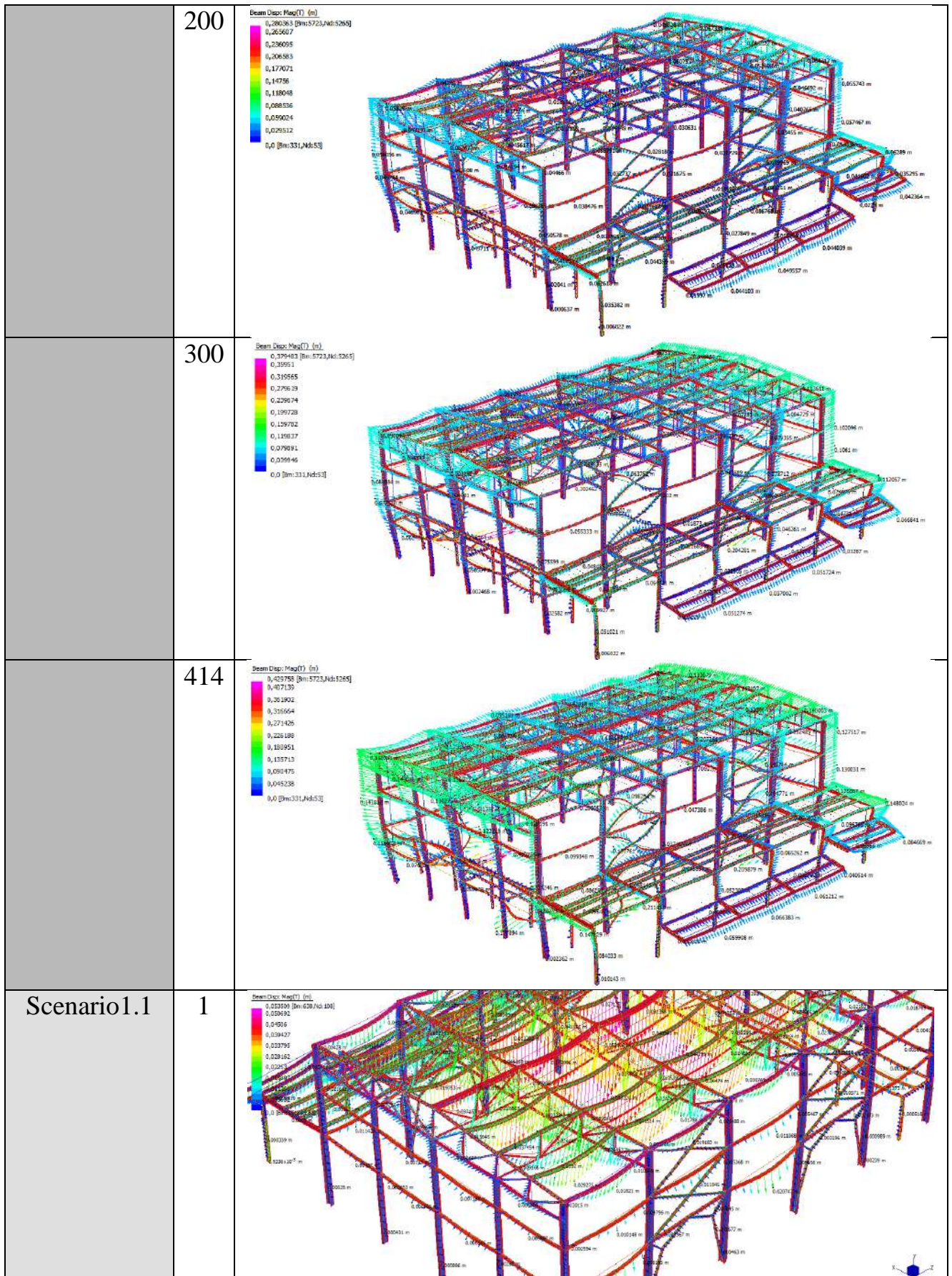


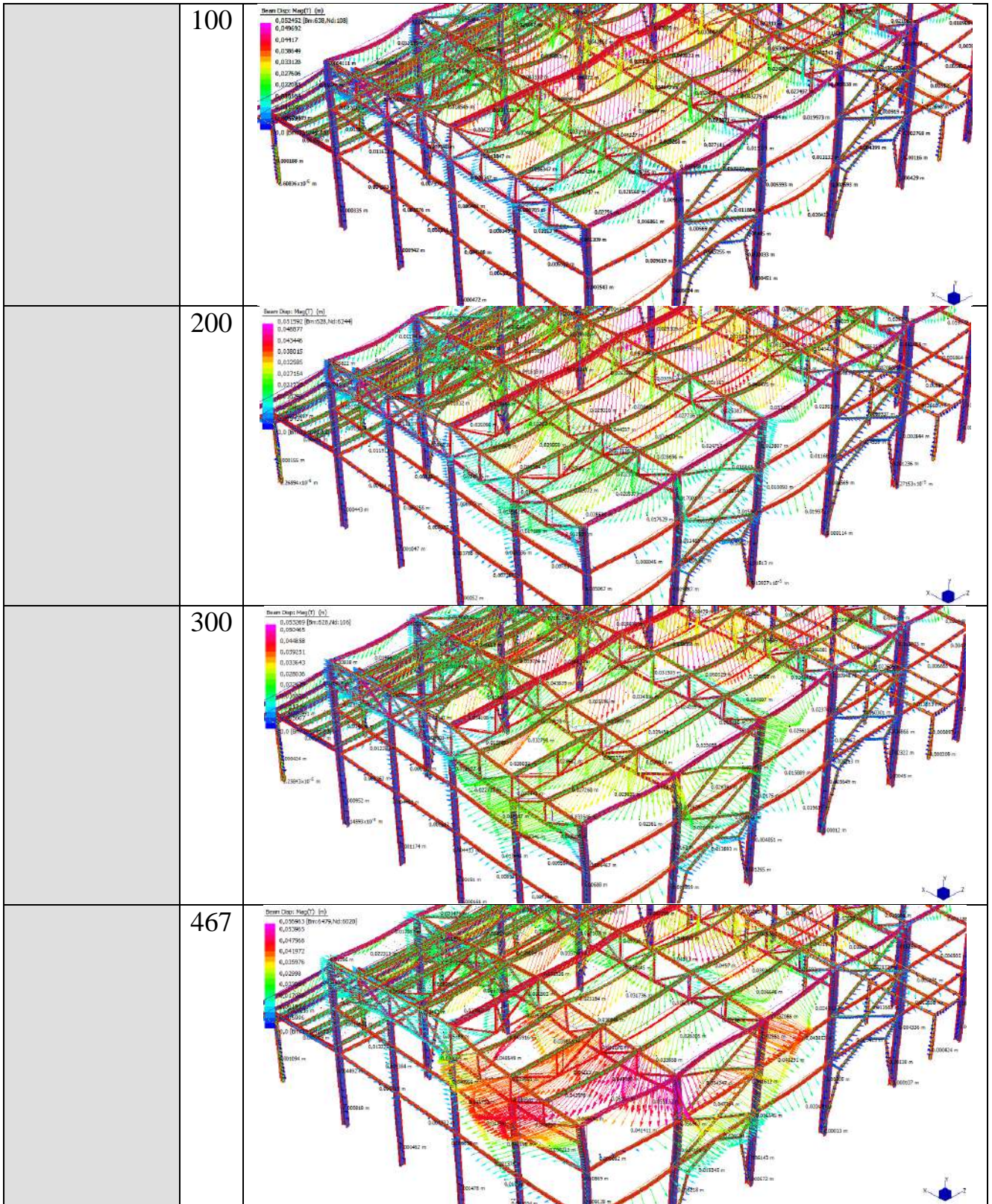
18

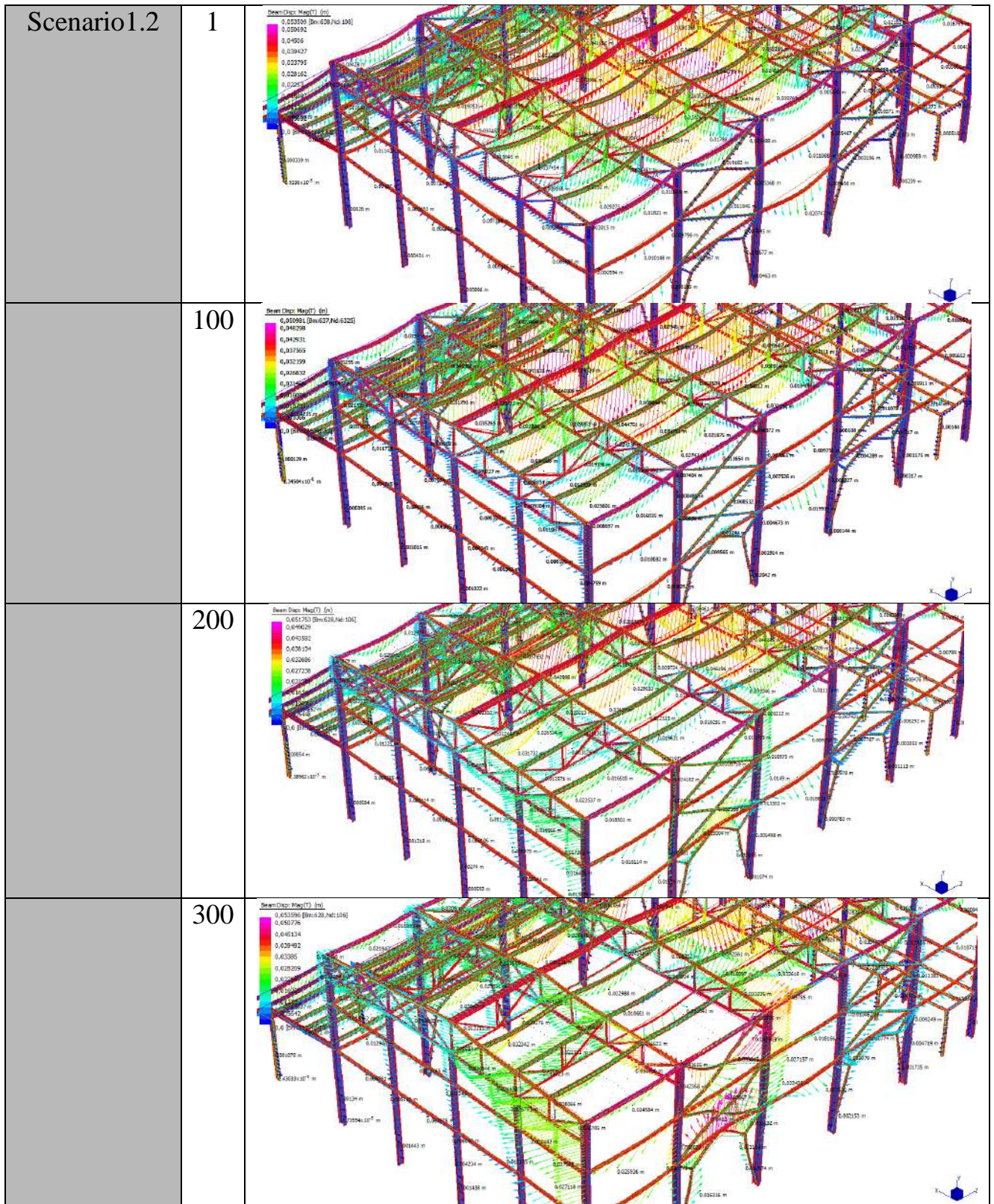


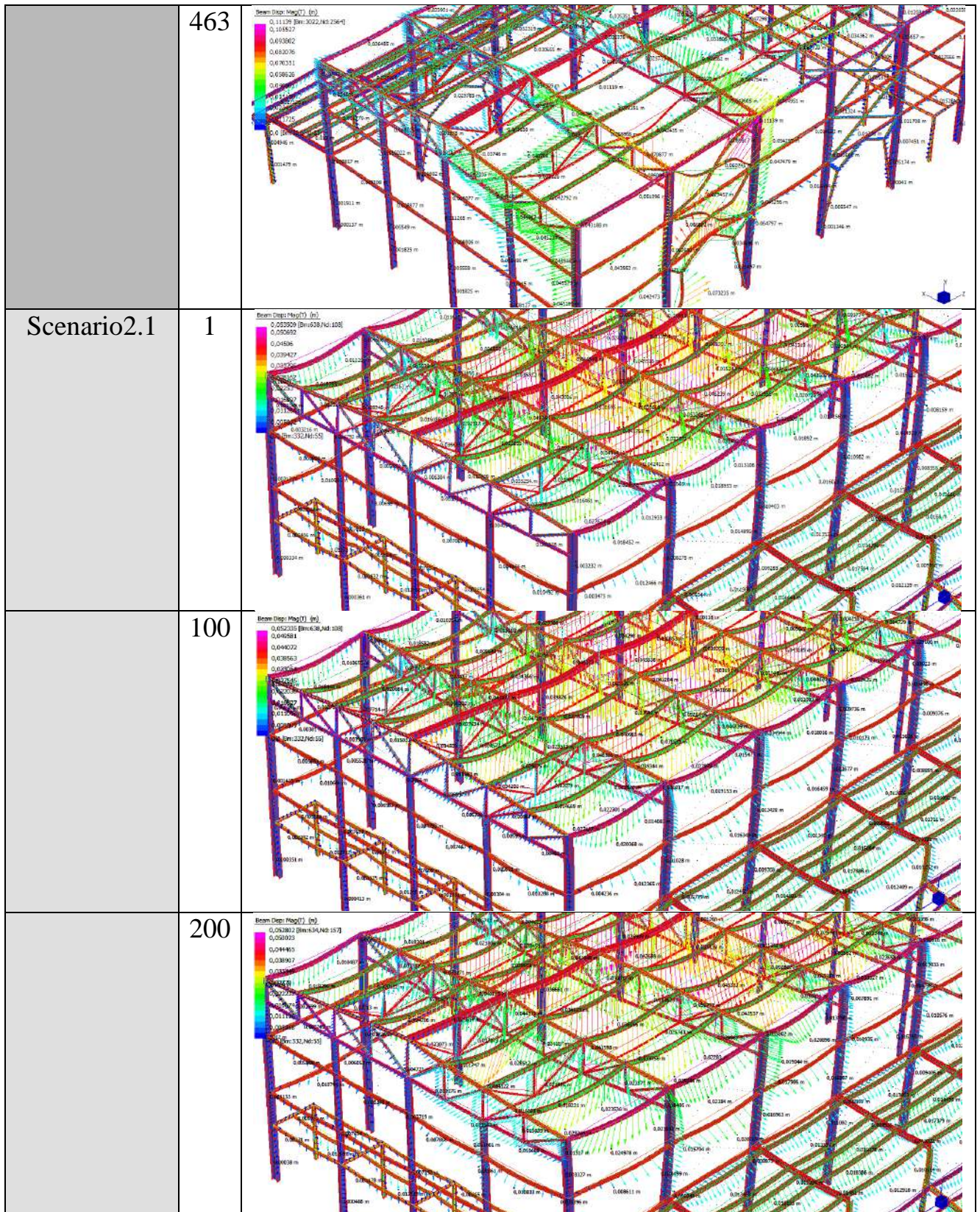
Di seguito si riportano i dettagli, per i 5 casi, delle zone in cui avviene il collasso rispetto alla condizione indeformata.

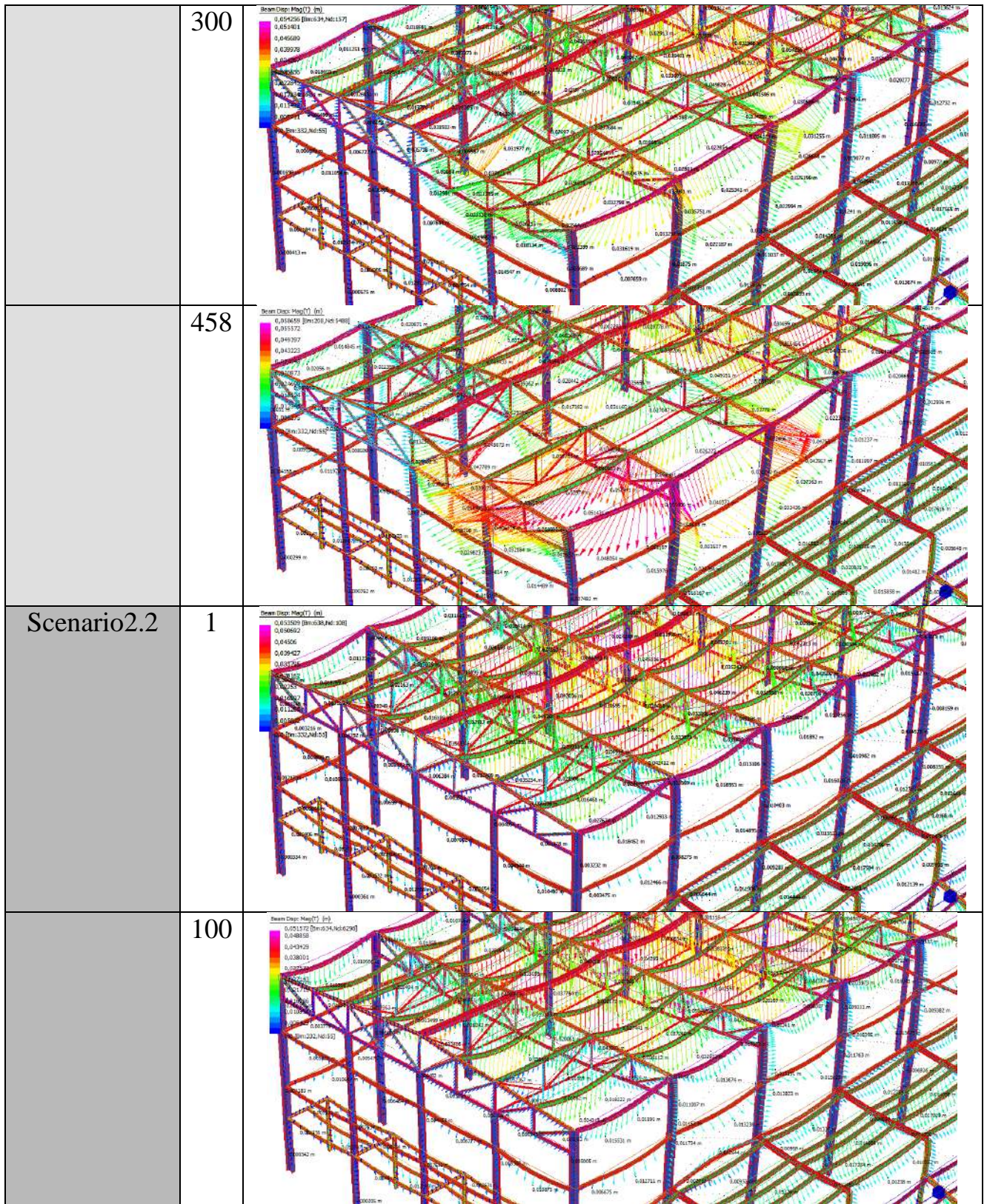
PARTICOLARI COSTRUTTIVI AL TEMPO t_{fail}		
	t [s]	
Generalizzato	1	
	100	

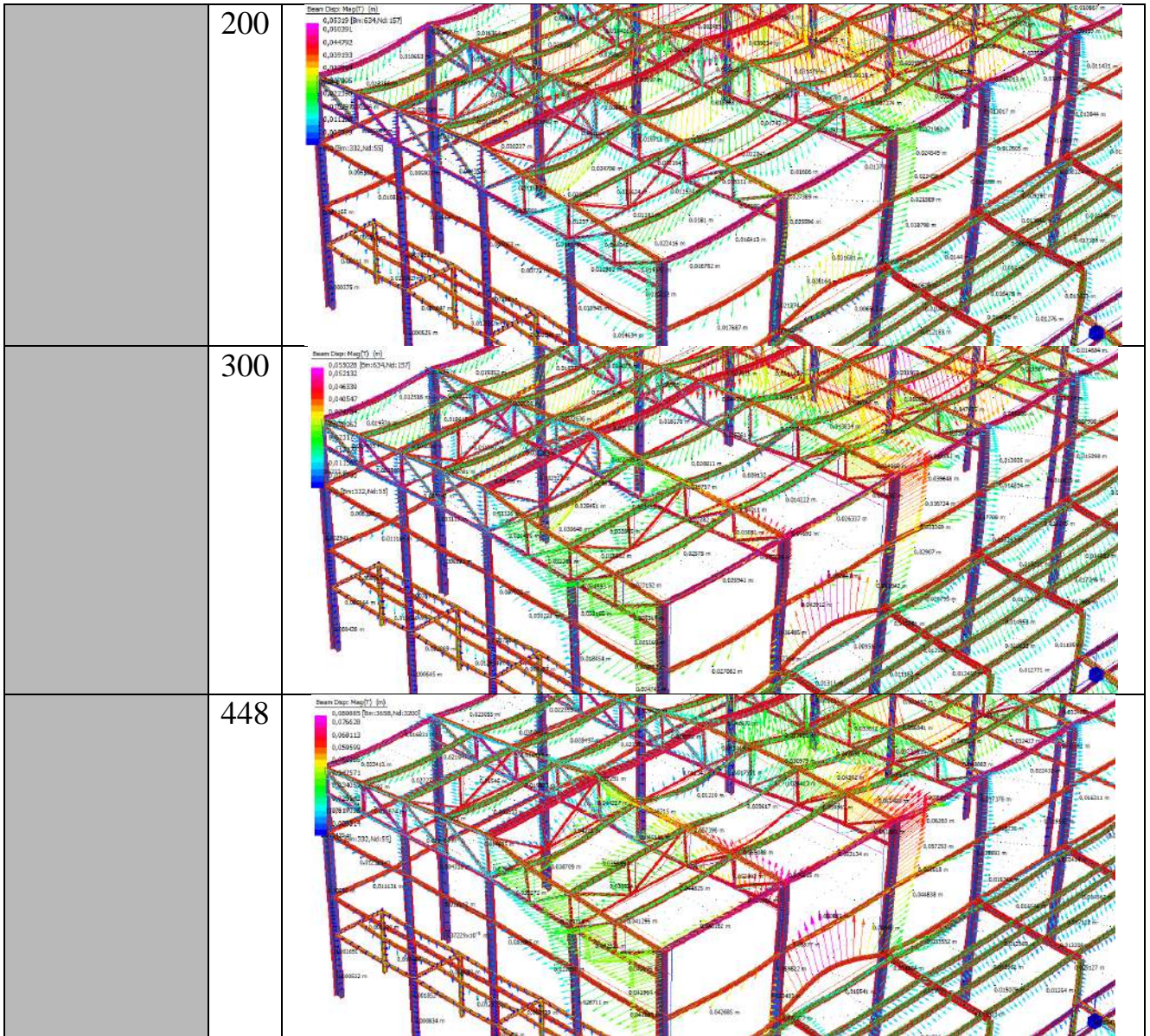












9 STRUTTURA IMPERFETTA

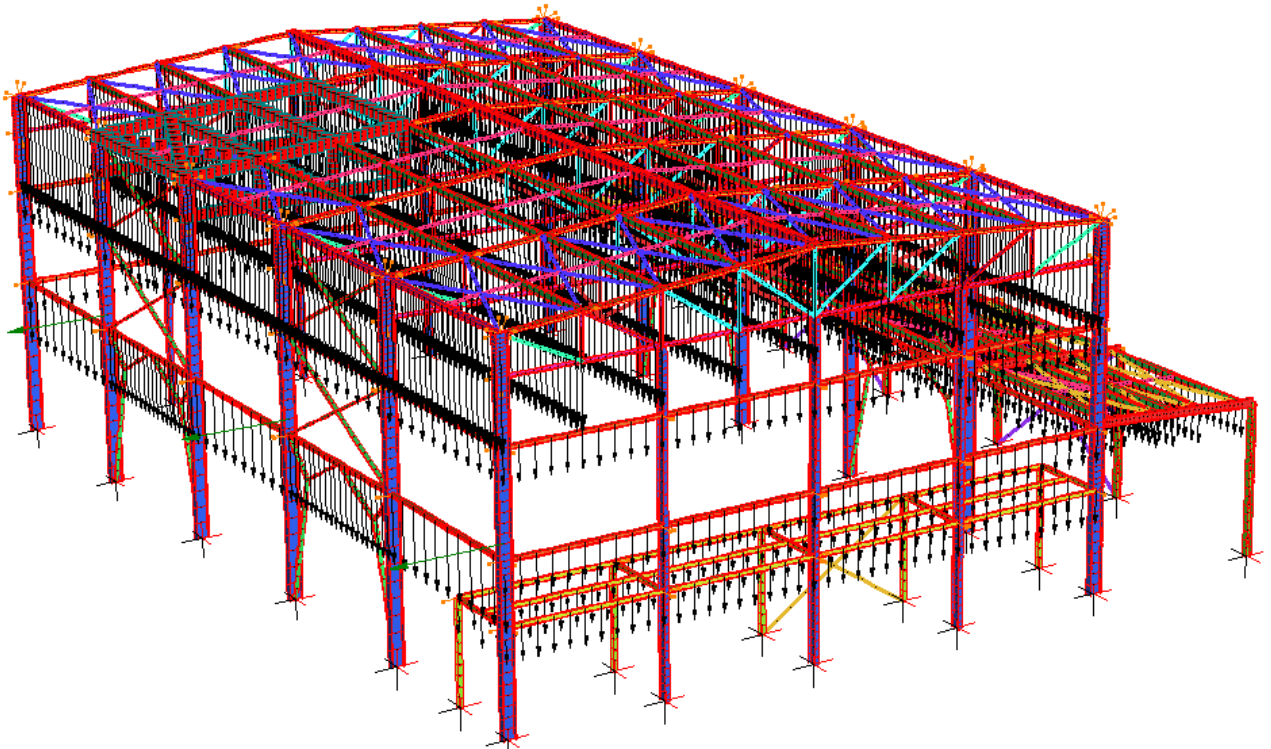
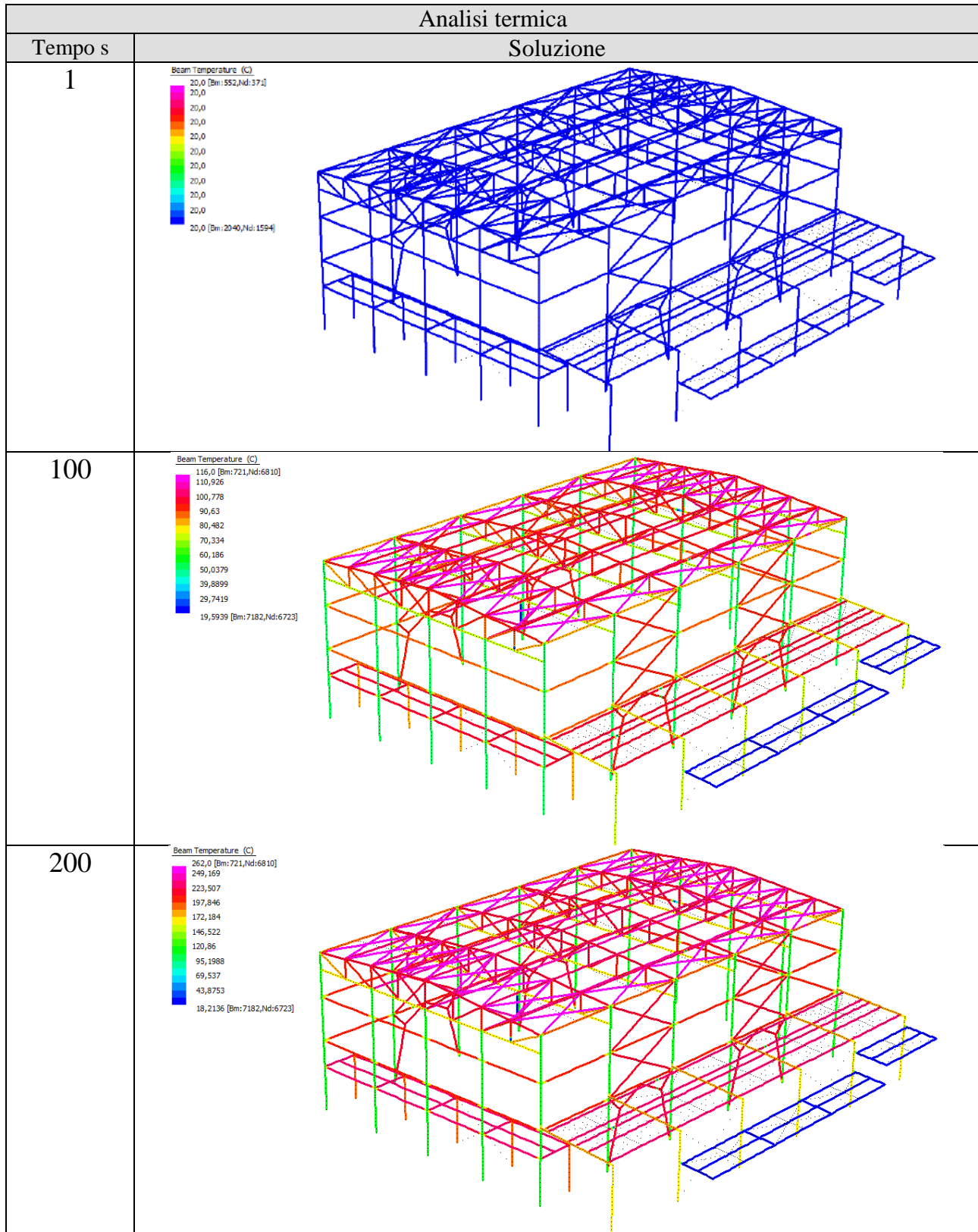


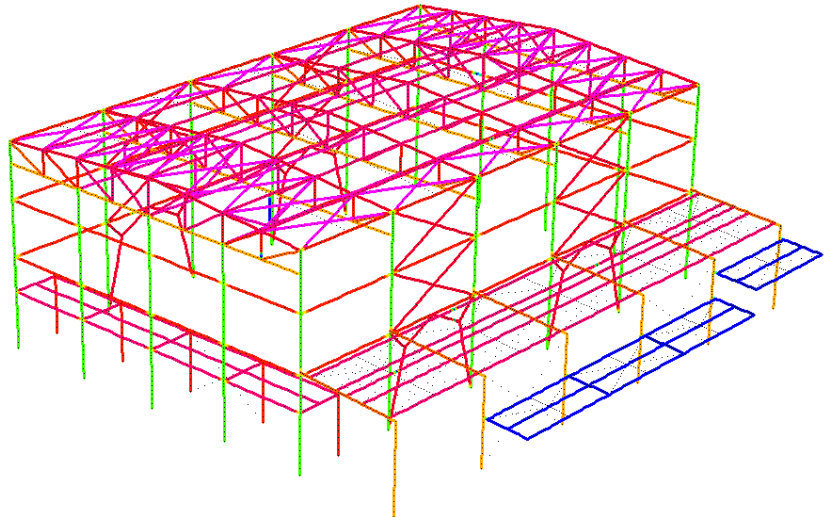
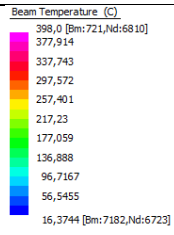
Figura 9.1-Struttura imperfetta

Alla struttura precedentemente analizzata, si applica un'imperfezione sotto forma di forza equivalente, pari a $F_{imp} = -0.01K_n$, nella direzione sfavorevole al collasso implosivo, a metà altezza del pilastro.

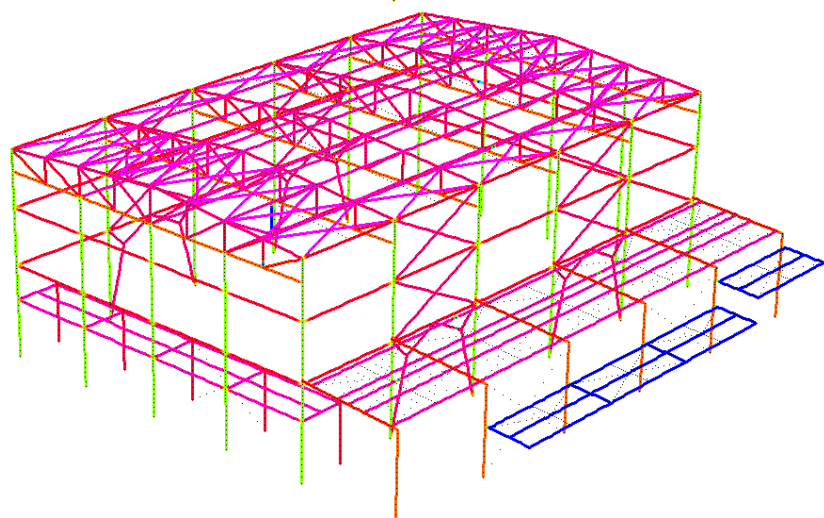
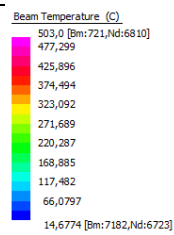
INCENDIO GENERALIZZATO – STRUTTURA IMPERFETTA



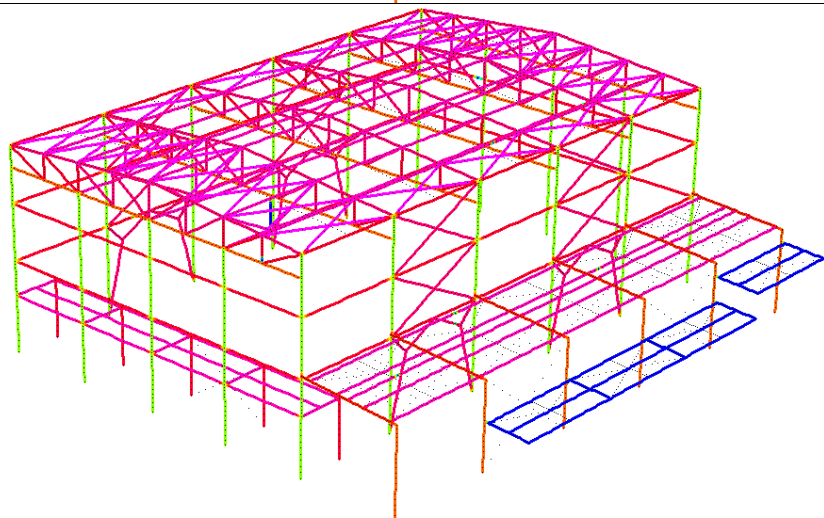
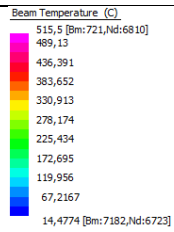
300



400



423

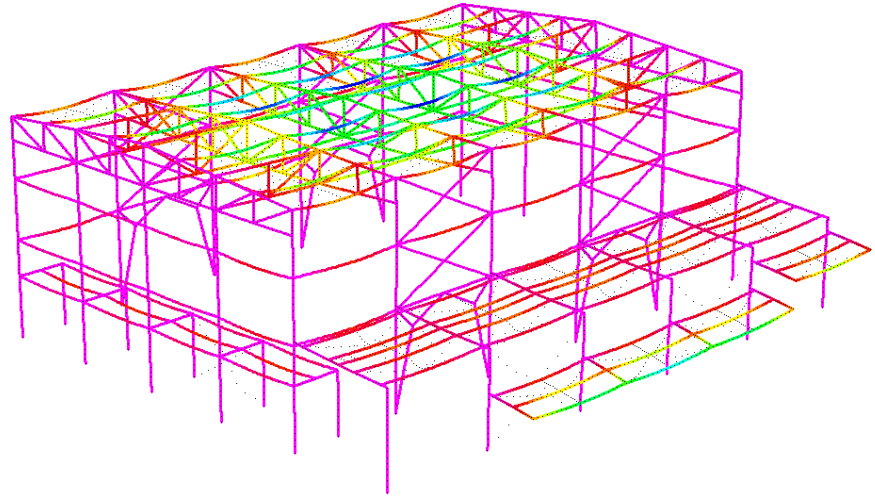
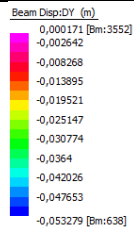


Analisi Meccanica

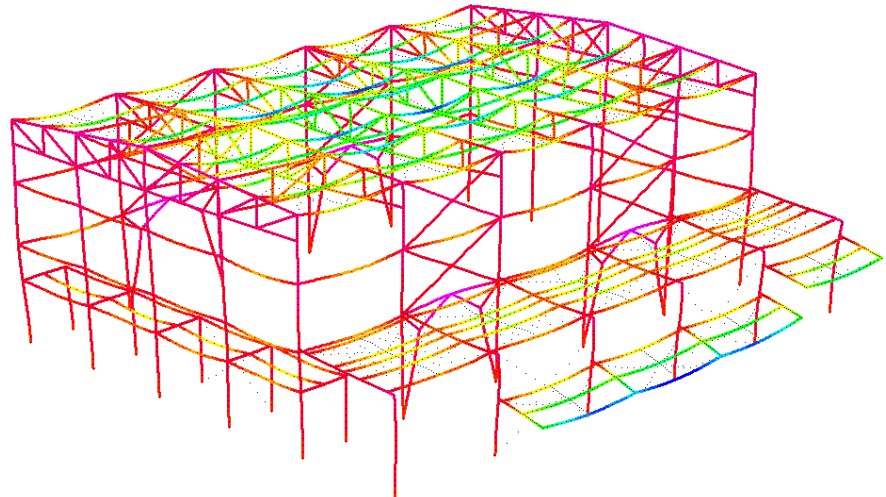
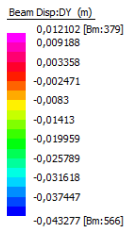
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

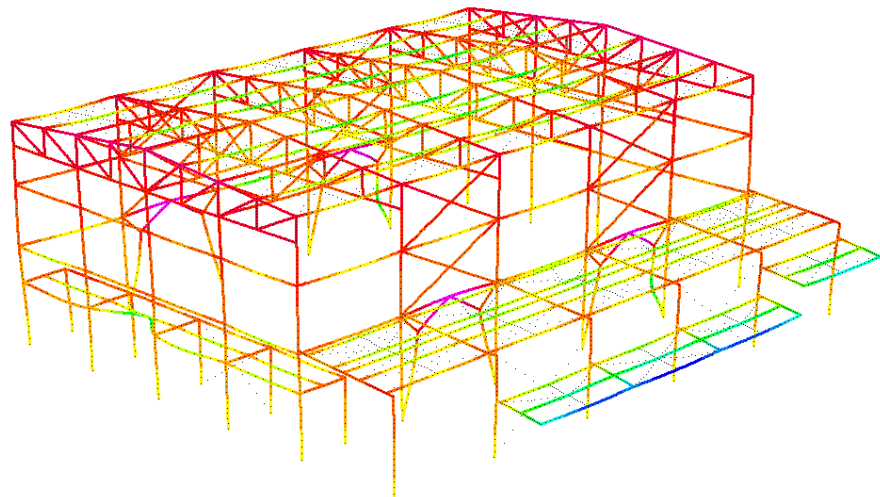
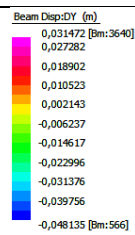
1



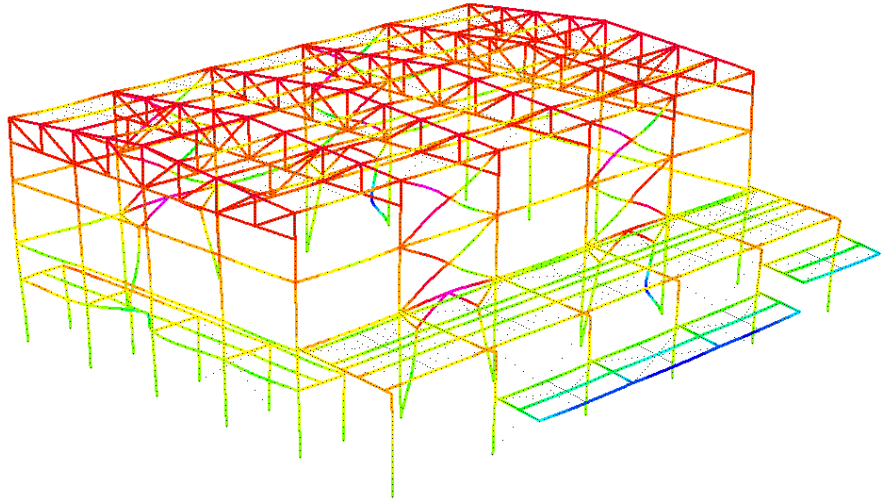
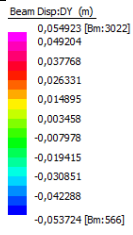
100



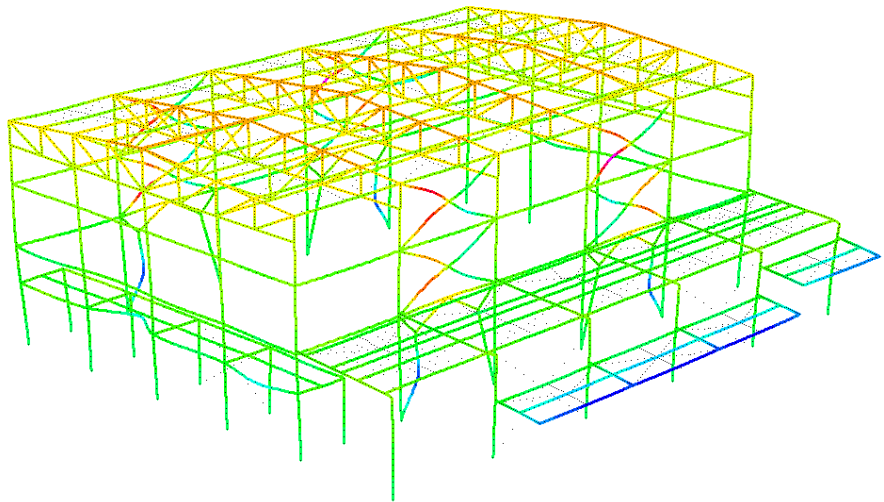
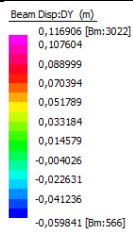
200



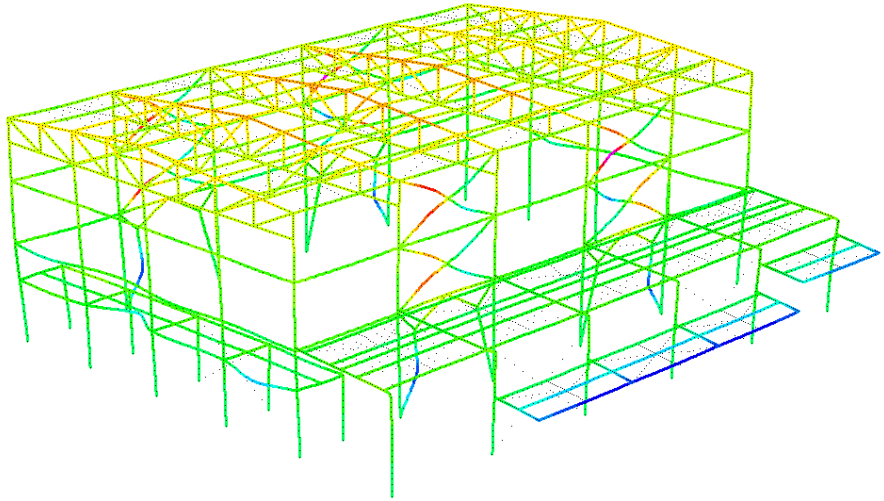
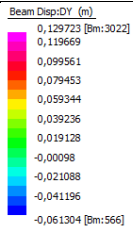
300



400



423

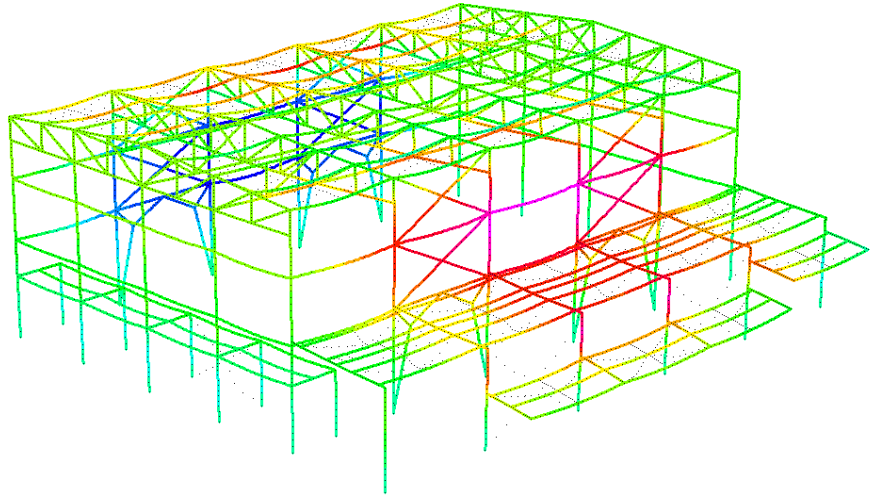
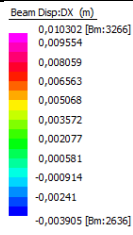


Analisi Meccanica

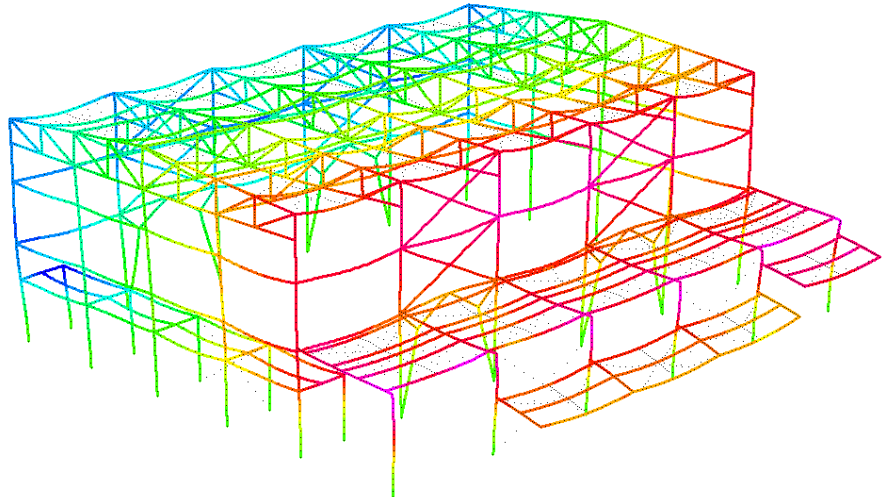
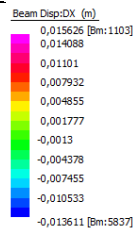
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

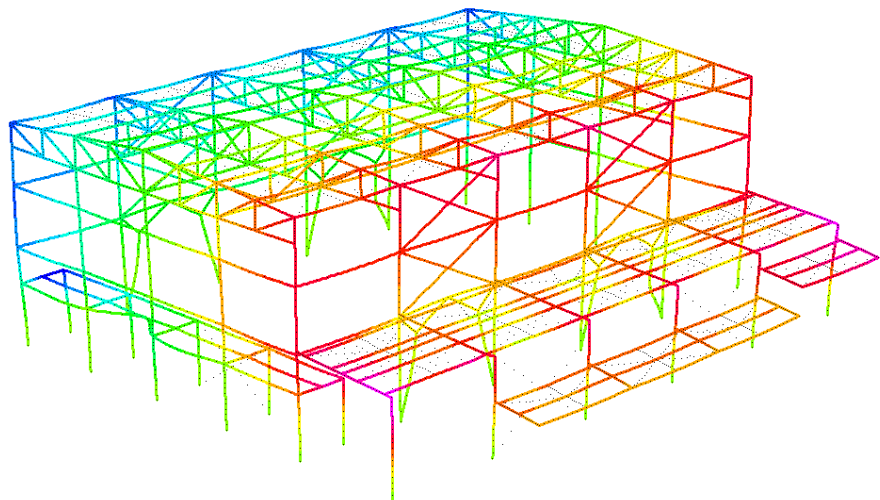
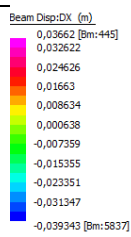
1



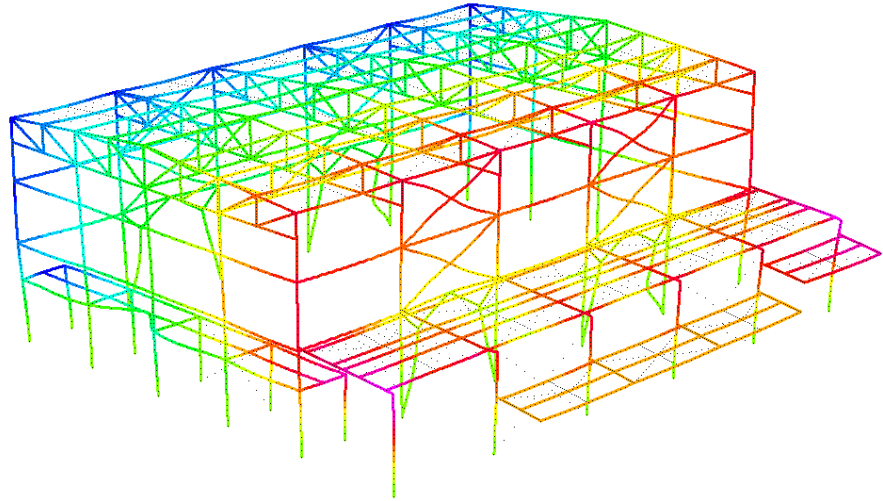
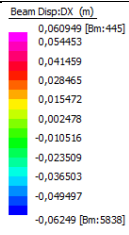
100



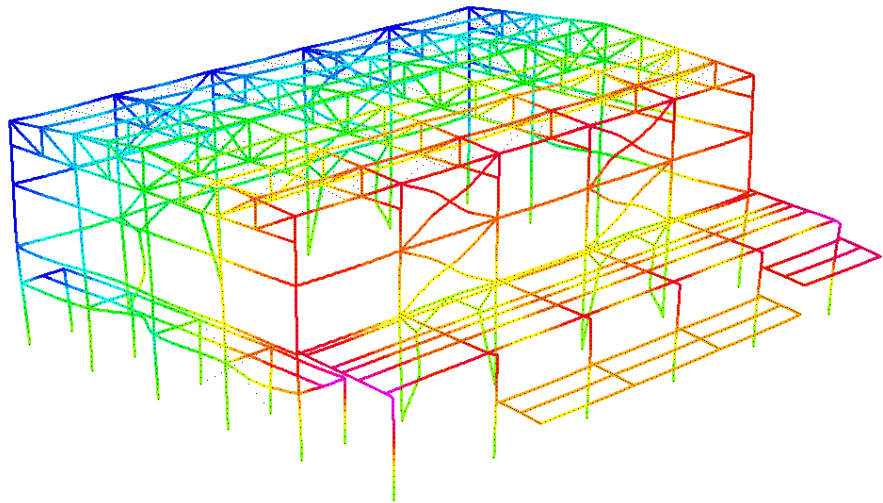
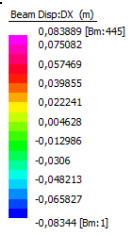
200



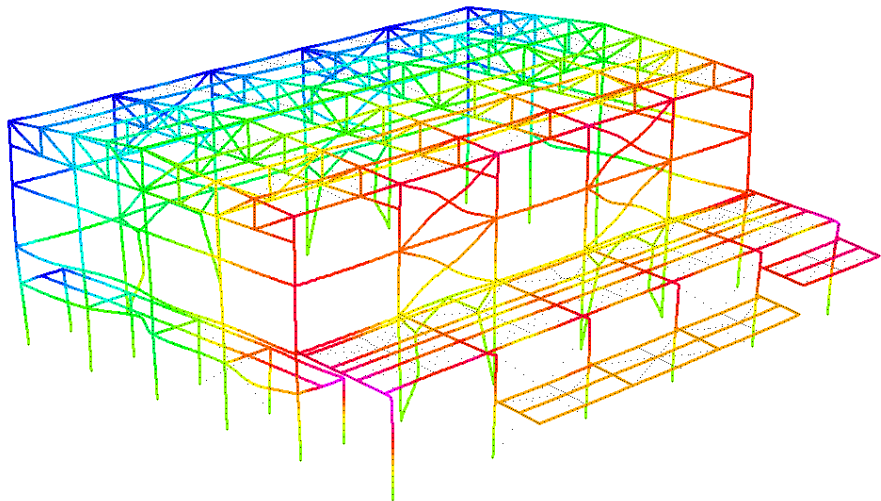
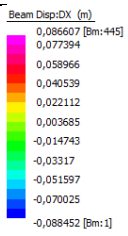
300



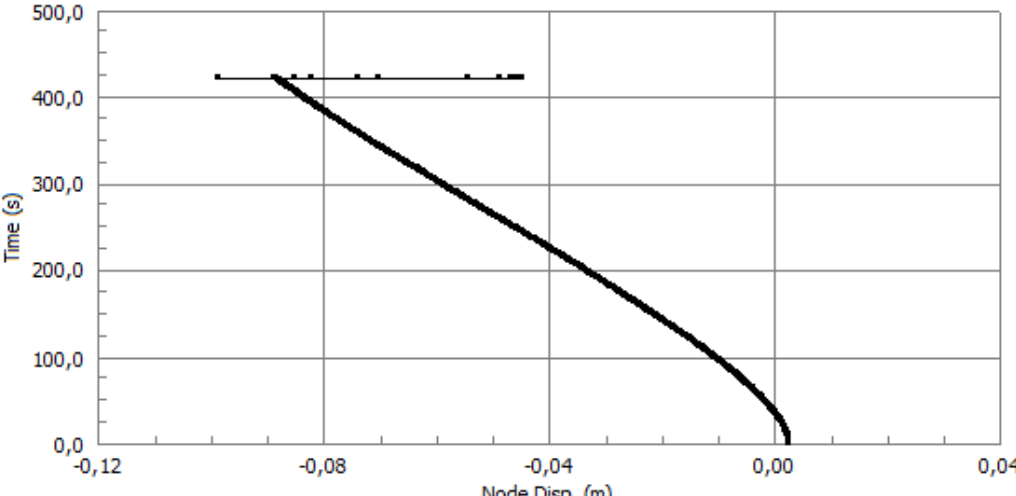
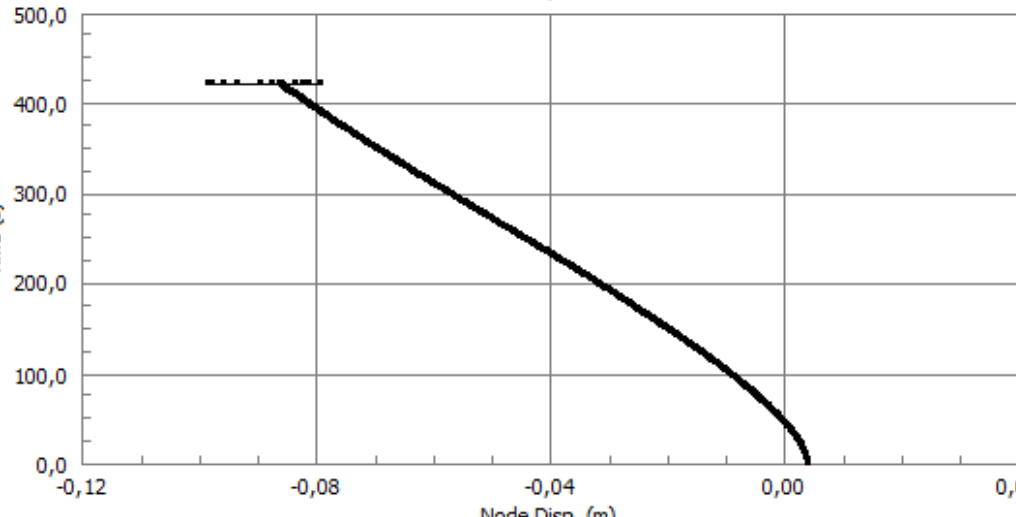
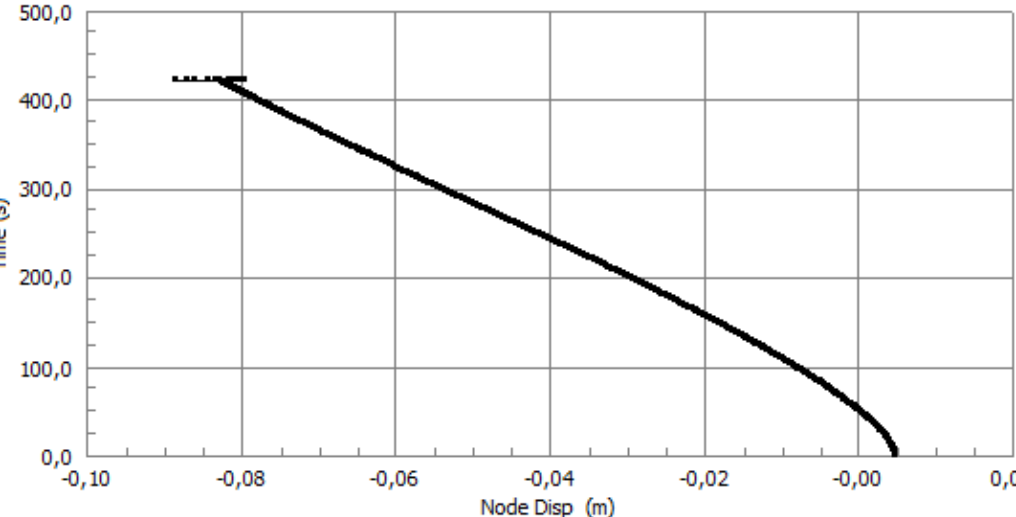
400



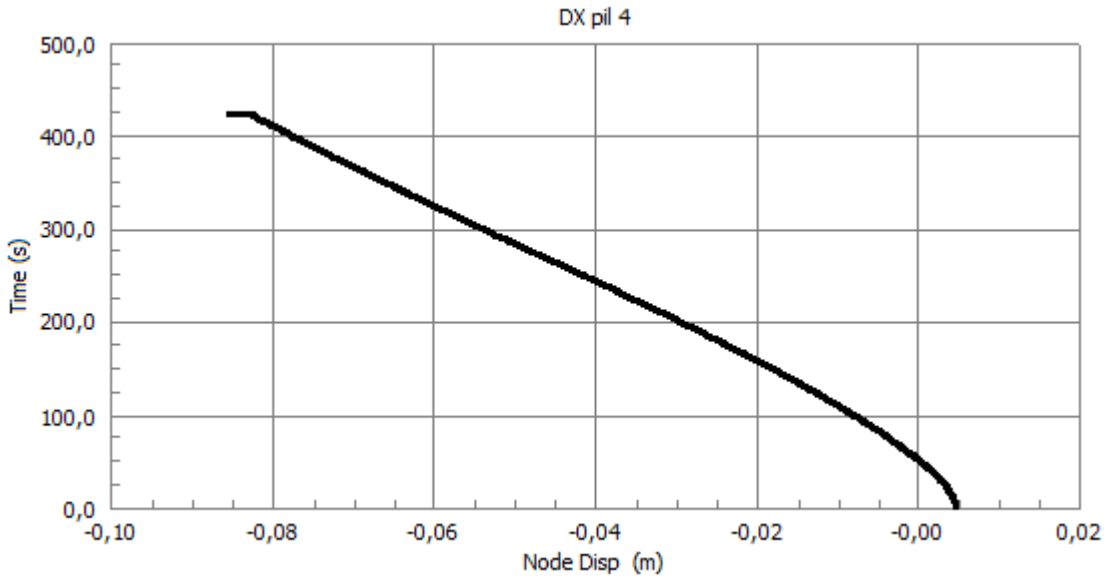
423



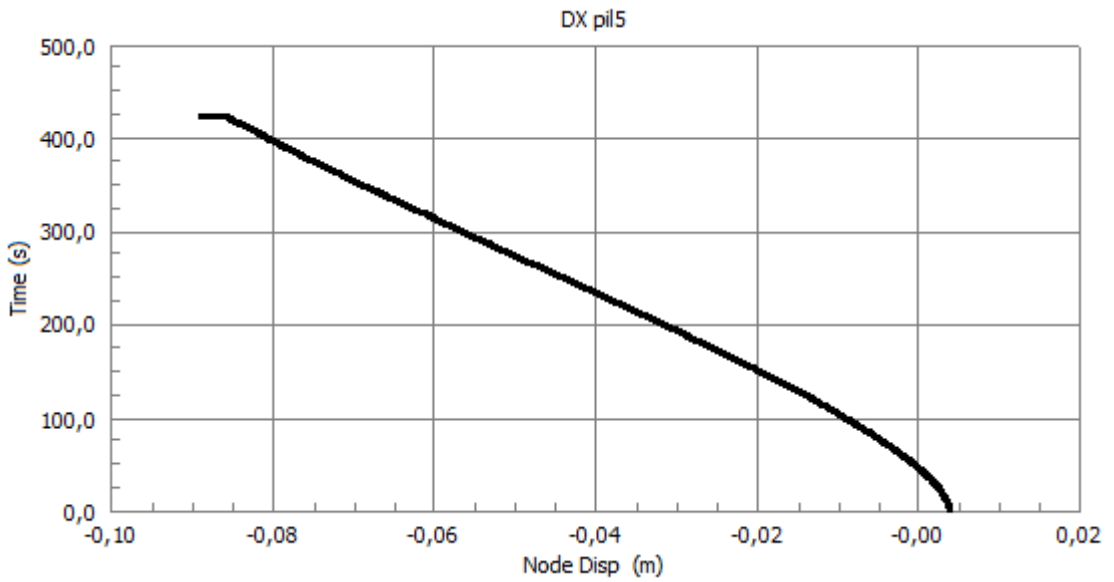
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p> 
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p> 
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p> 

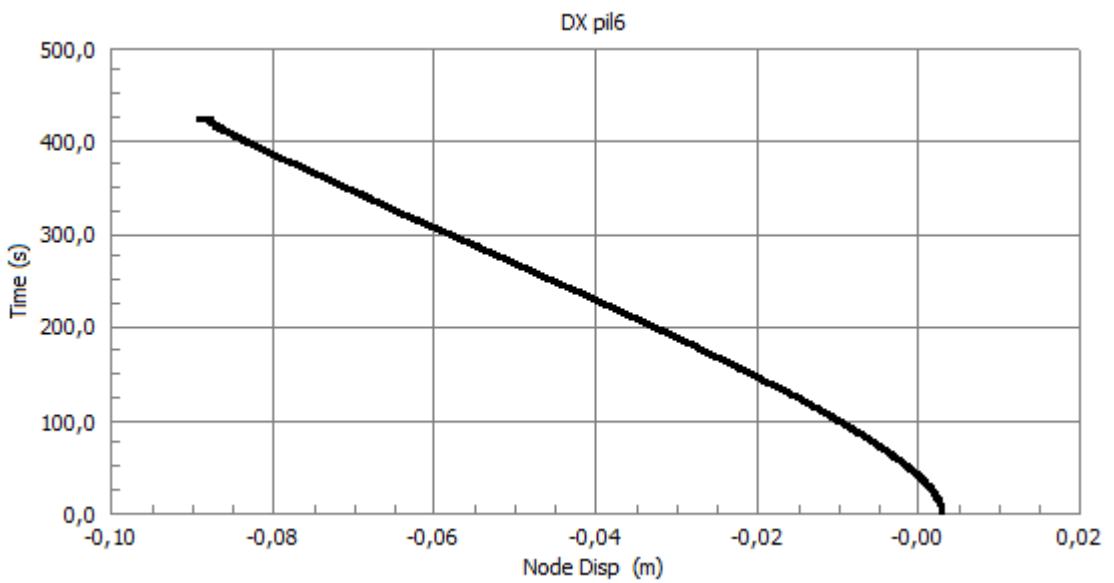
4



5



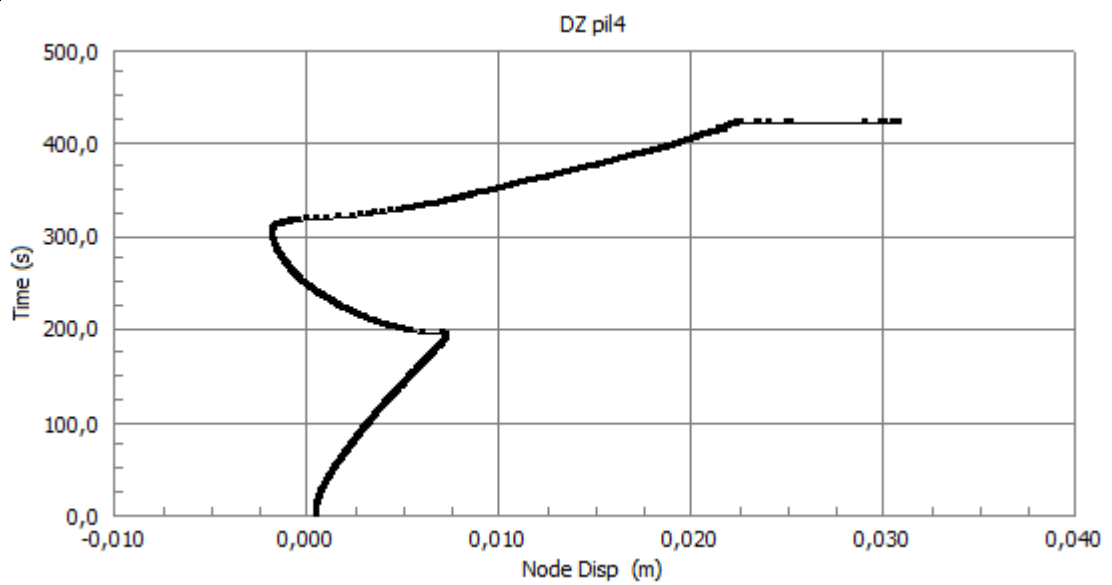
6



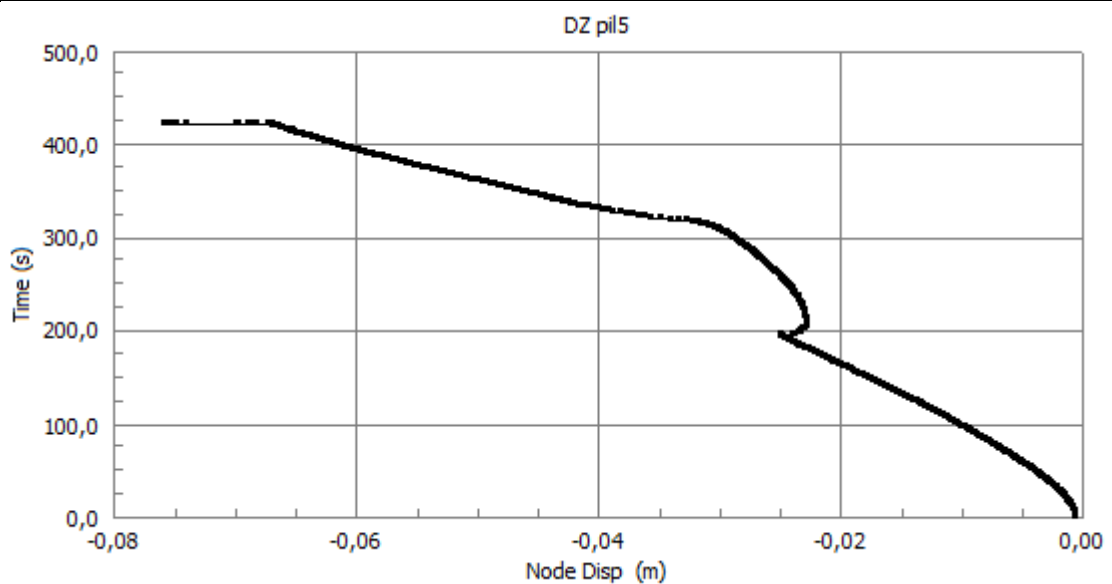
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>

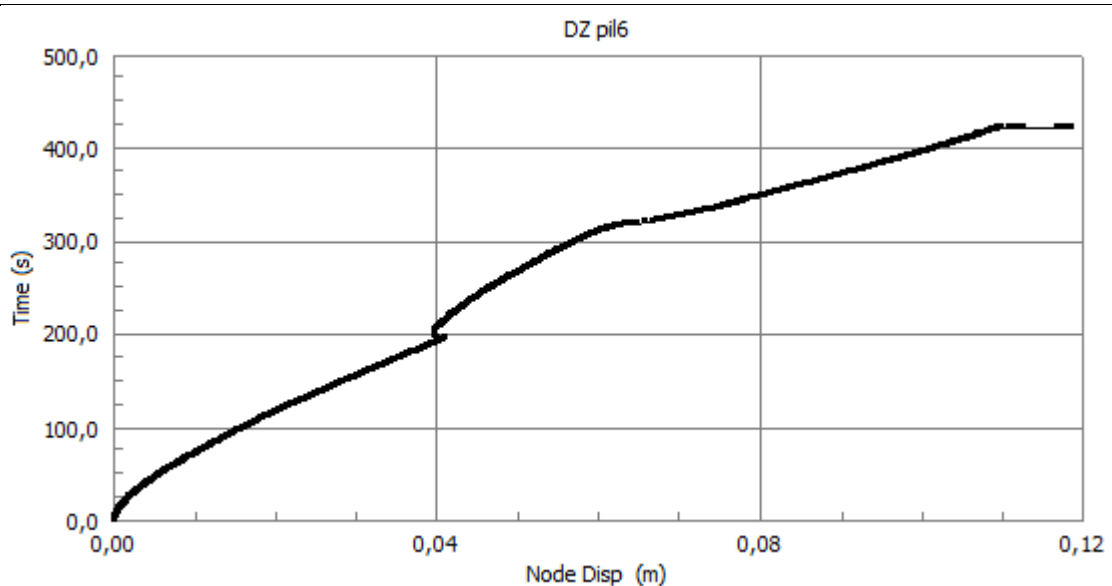
10



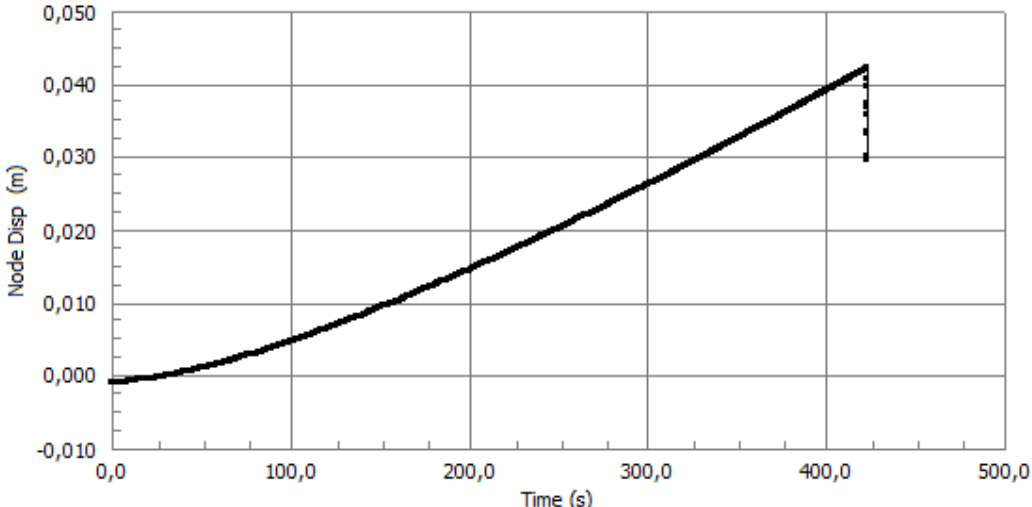
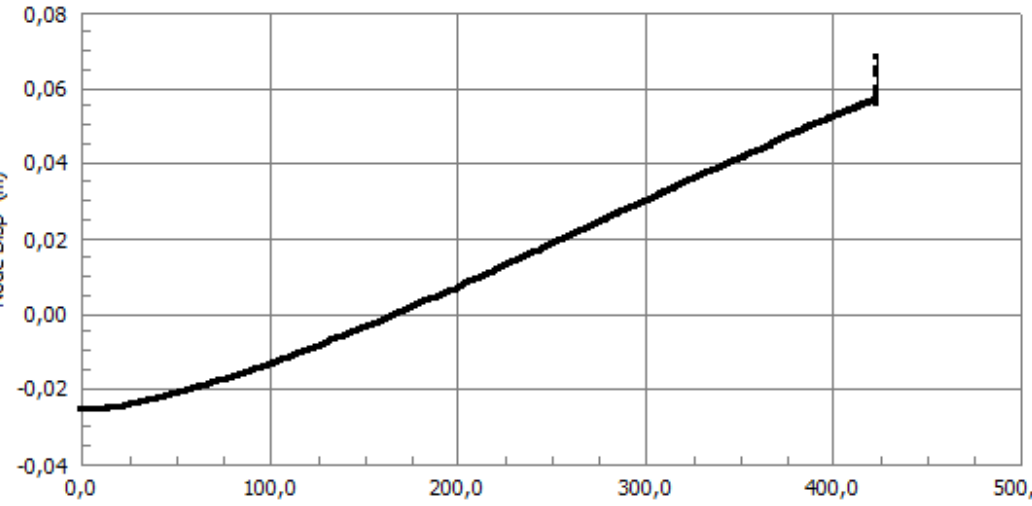
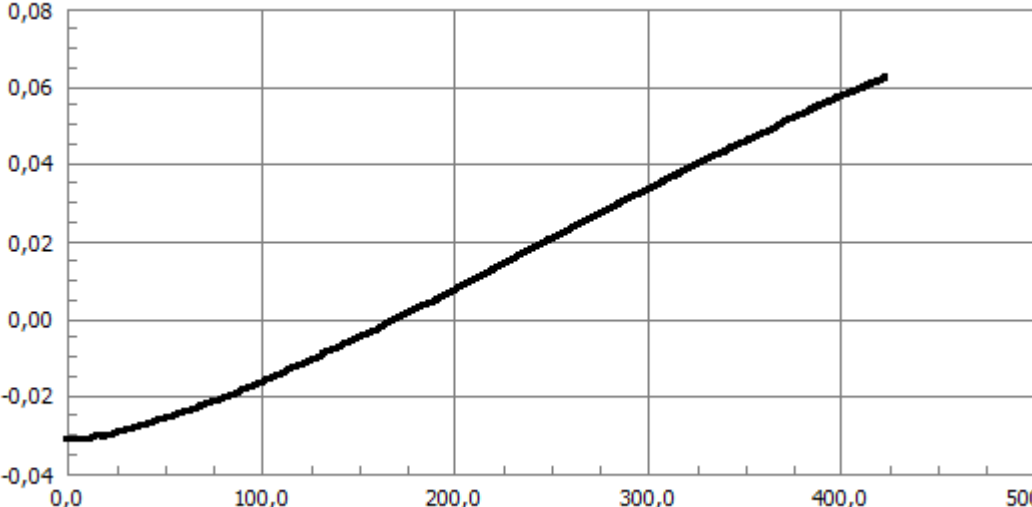
11



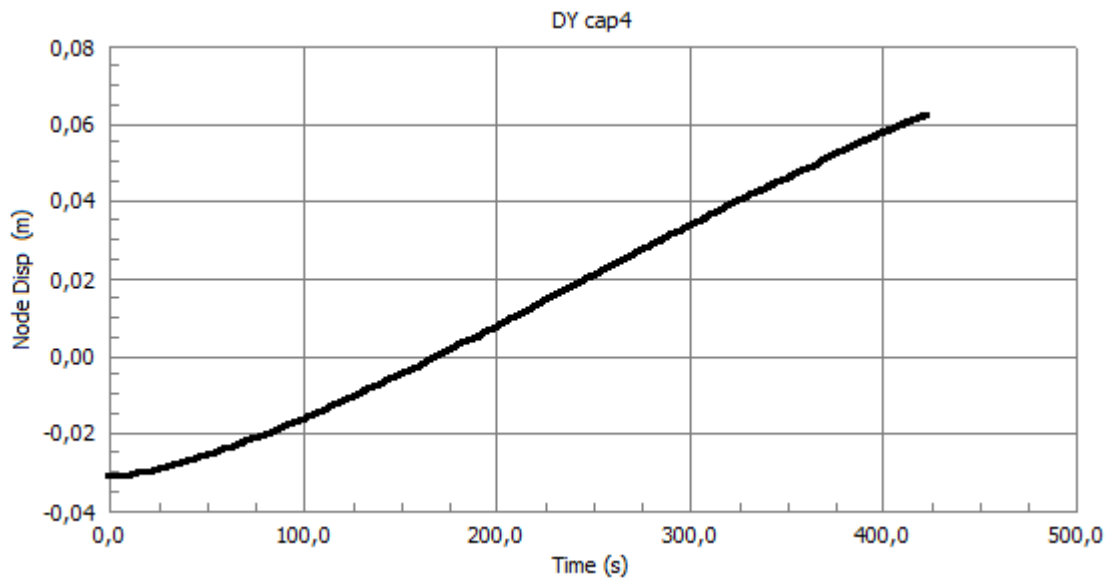
12



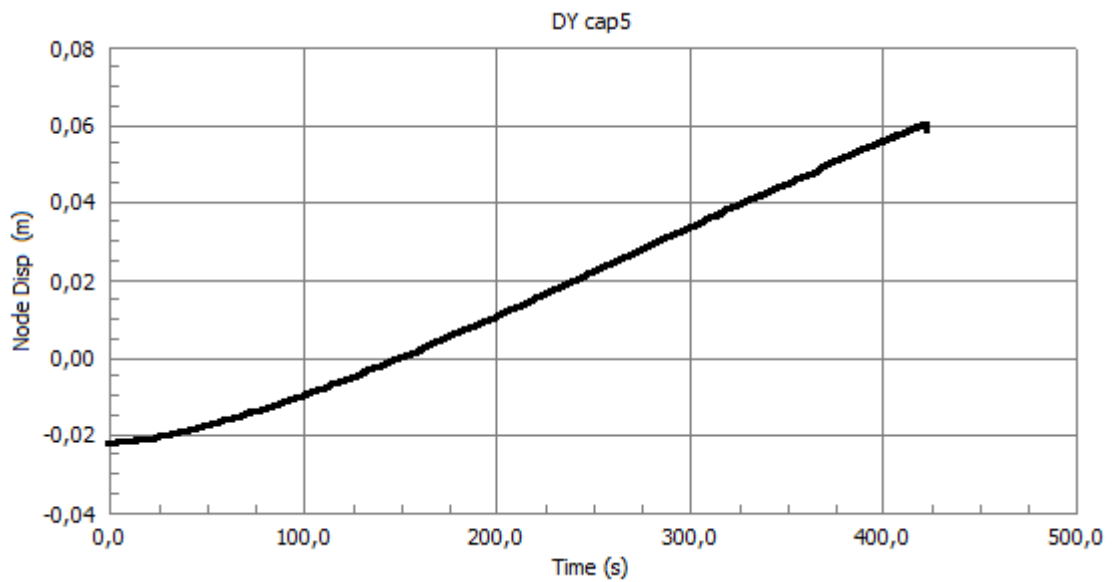
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico
<p>13</p>	<p>DY cap1</p> 
<p>14</p>	<p>DY cap2</p> 
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p> 

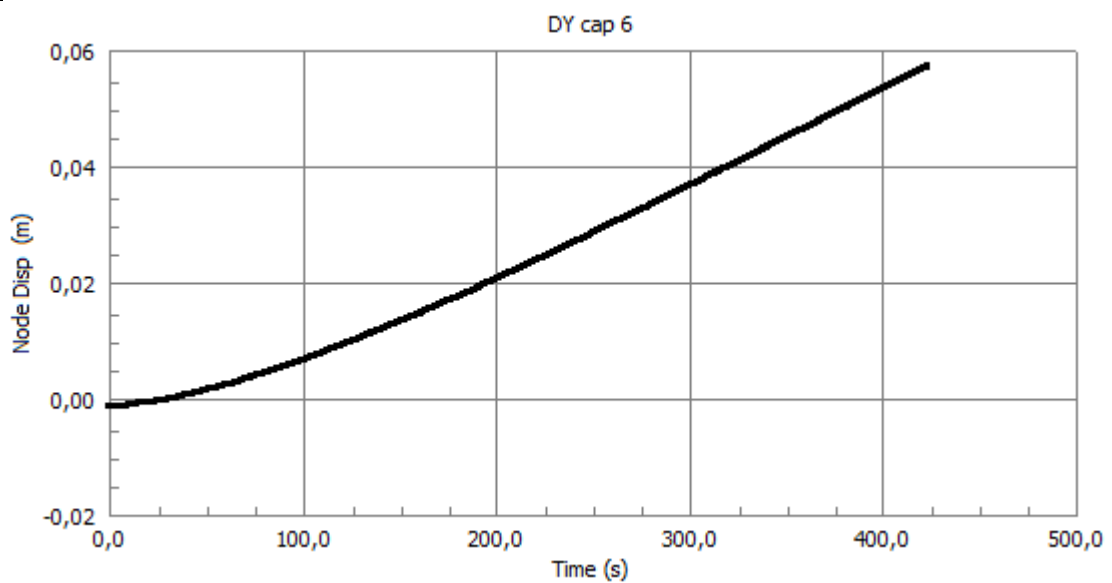
16



17



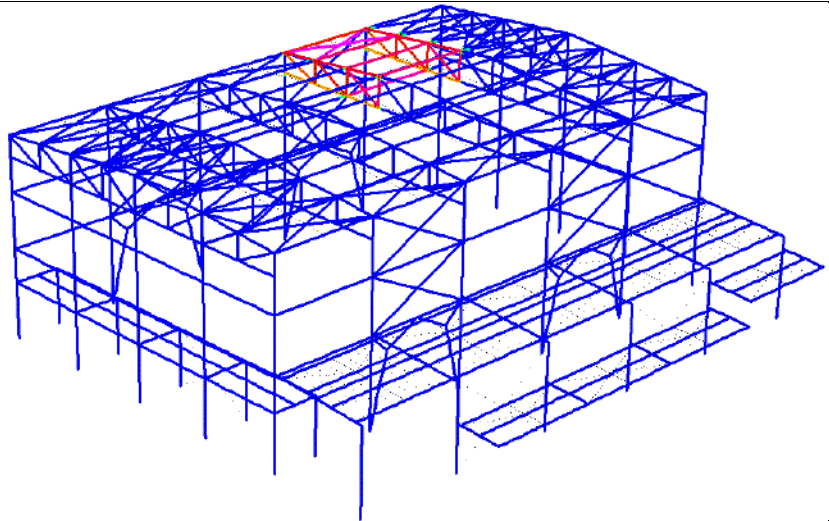
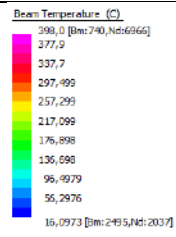
18



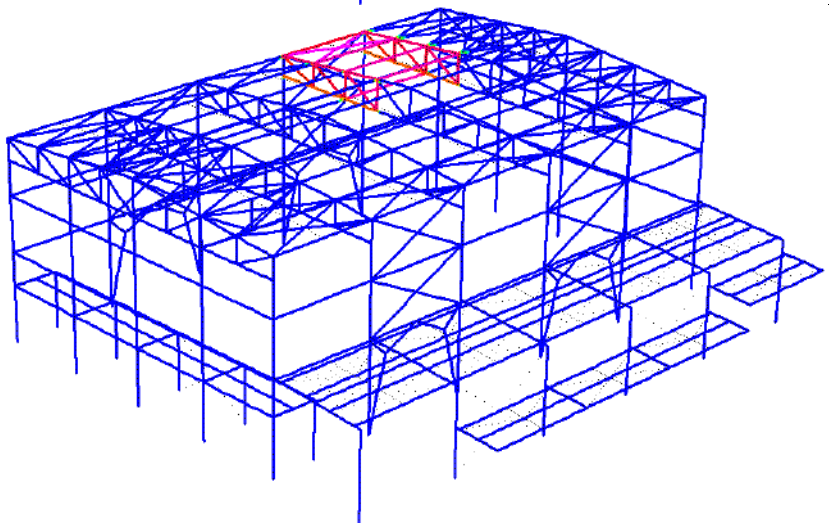
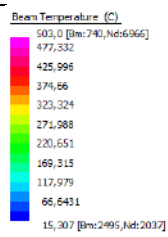
SCENARIO 1.1– STRUTTURA IMPERFETTA

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Temperature (C)</p>
100	<p>Beam Temperature (C)</p>
200	<p>Beam Temperature (C)</p>

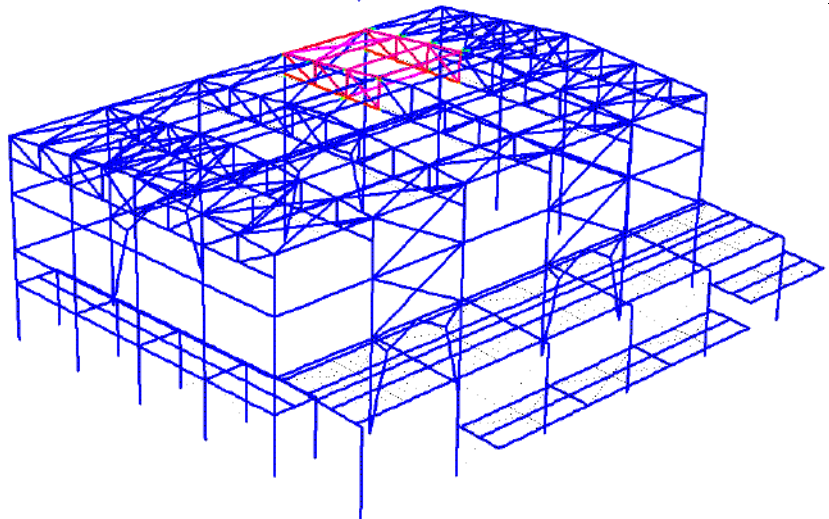
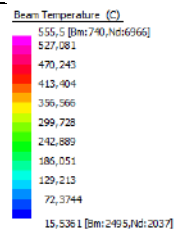
300



400



467

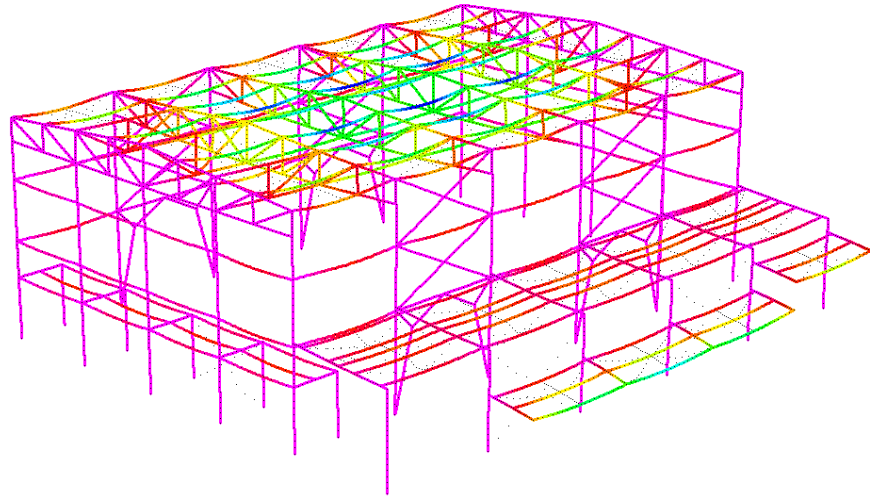
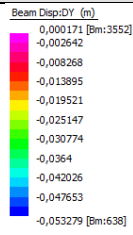


Analisi Meccanica

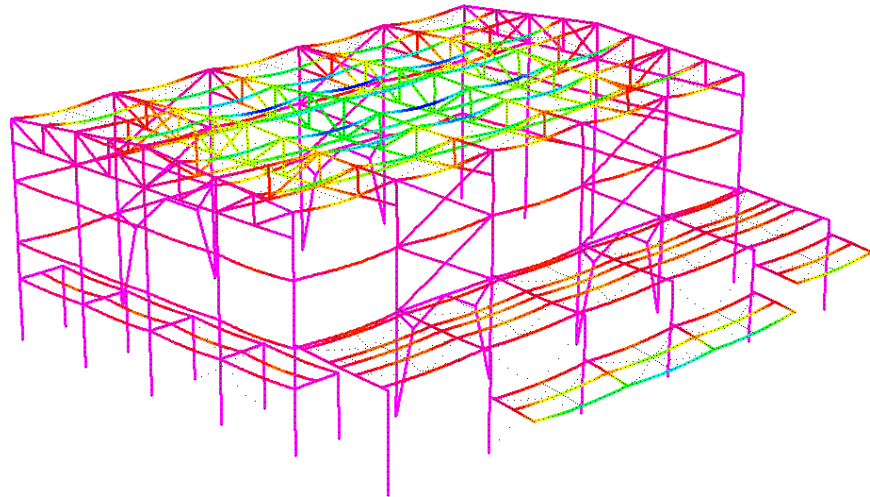
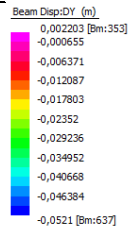
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

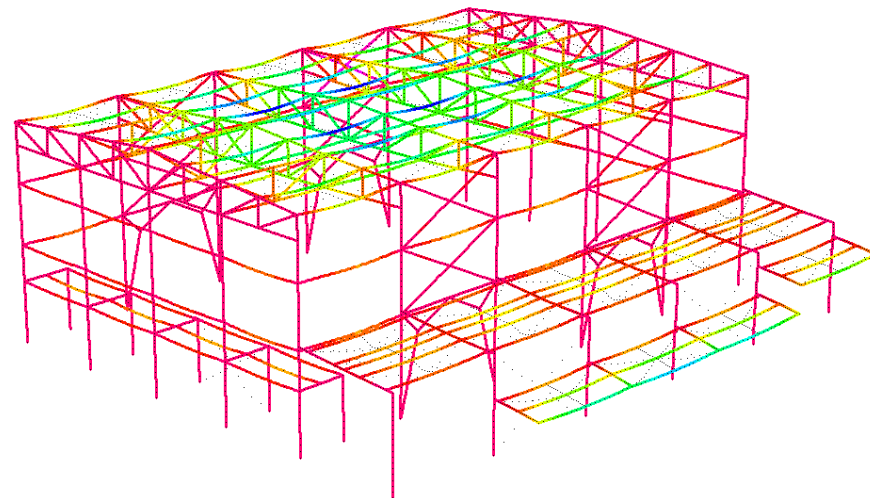
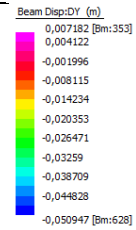
1



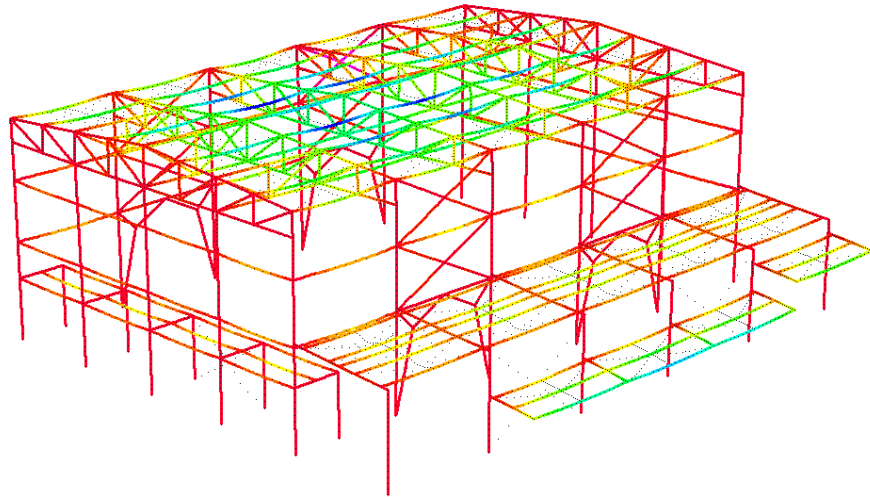
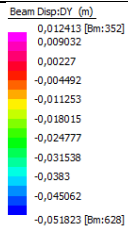
100



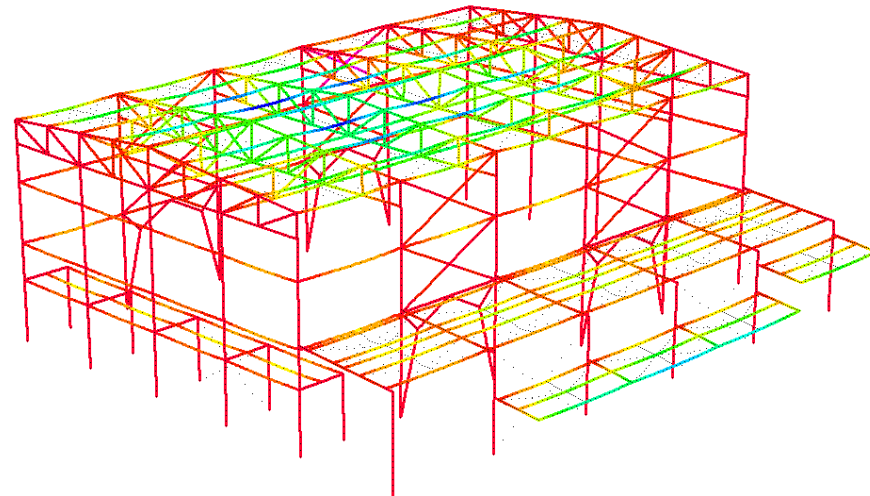
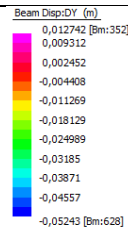
200



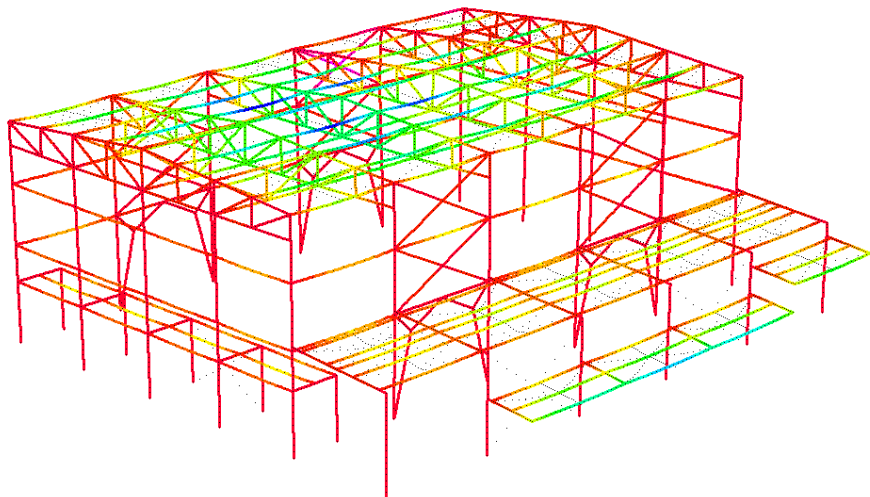
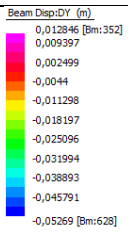
300



400



467

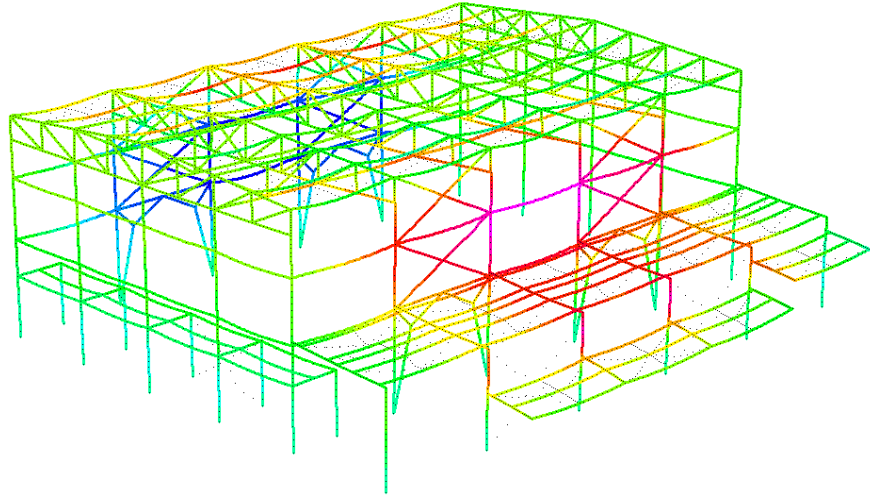
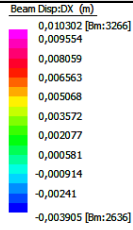


Analisi Meccanica

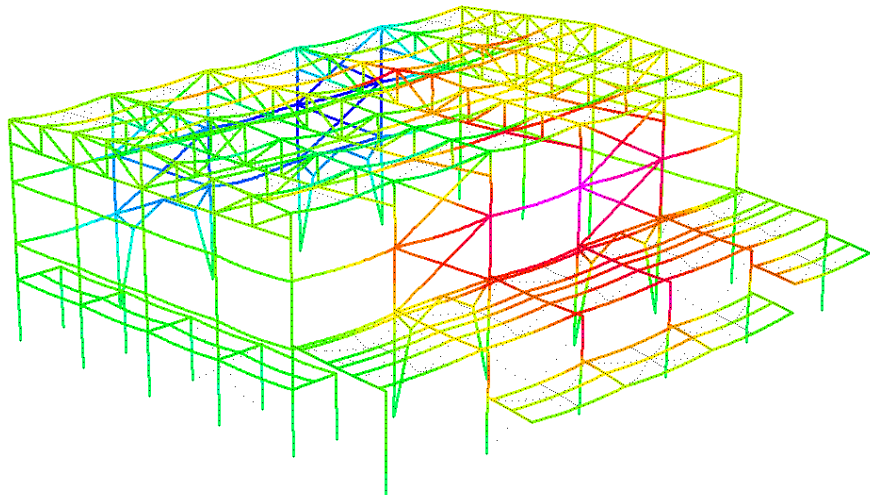
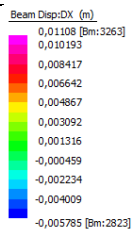
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

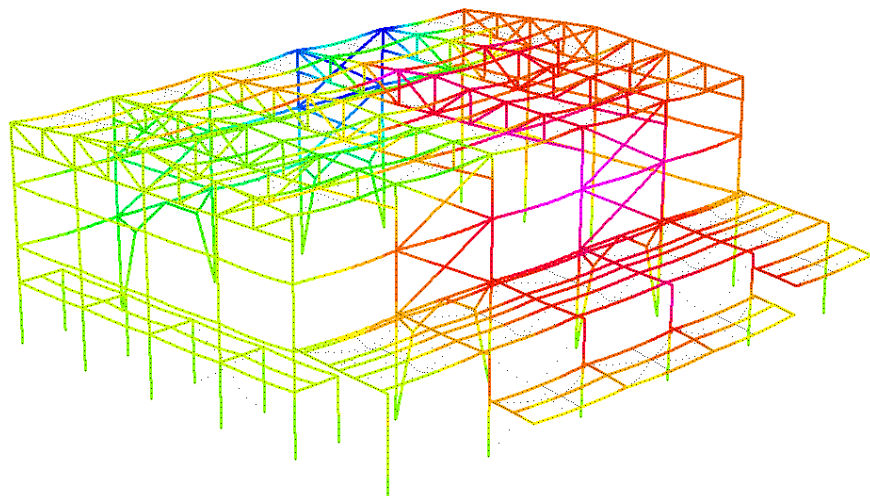
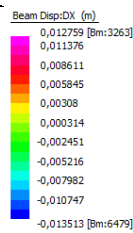
1



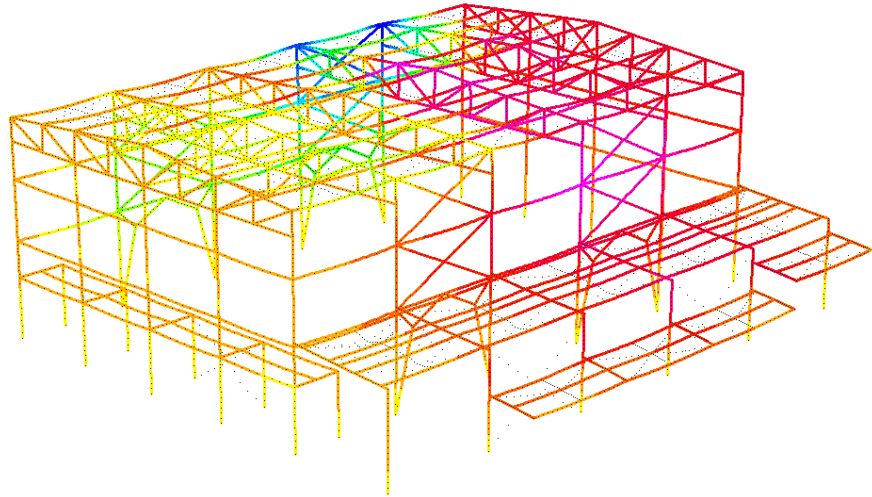
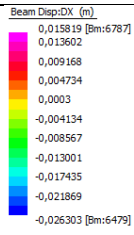
100



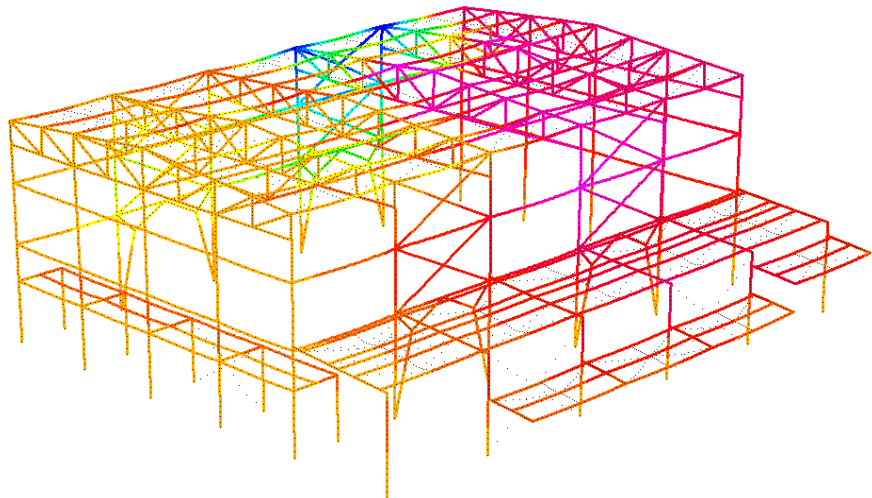
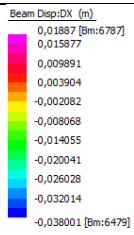
200



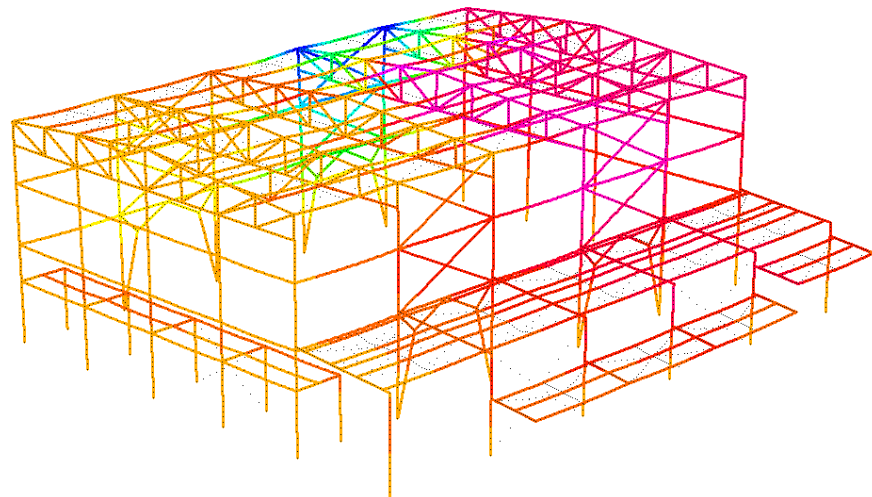
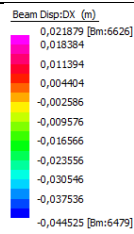
300



400



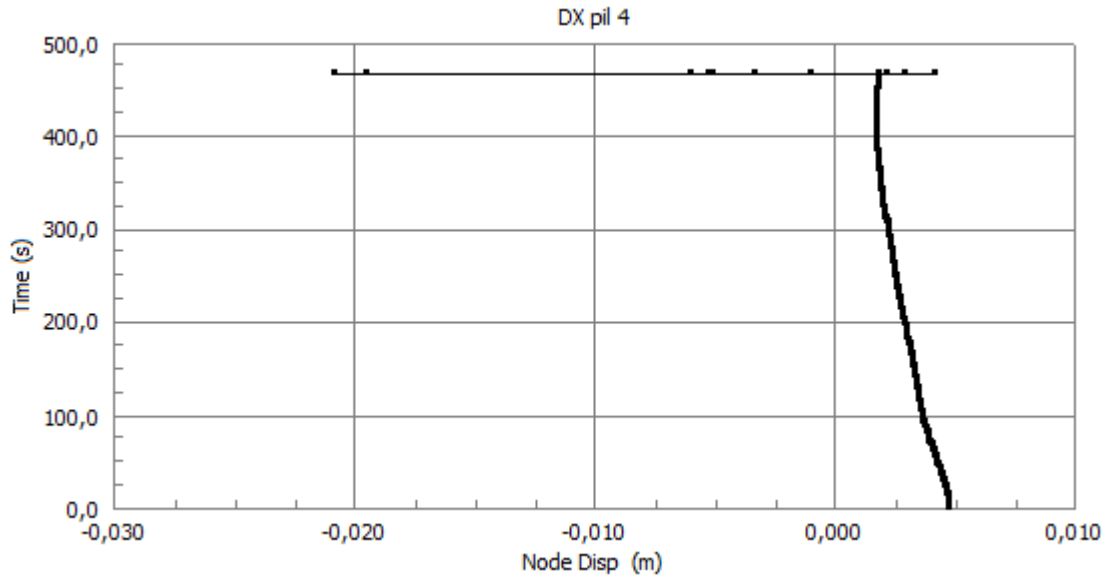
467



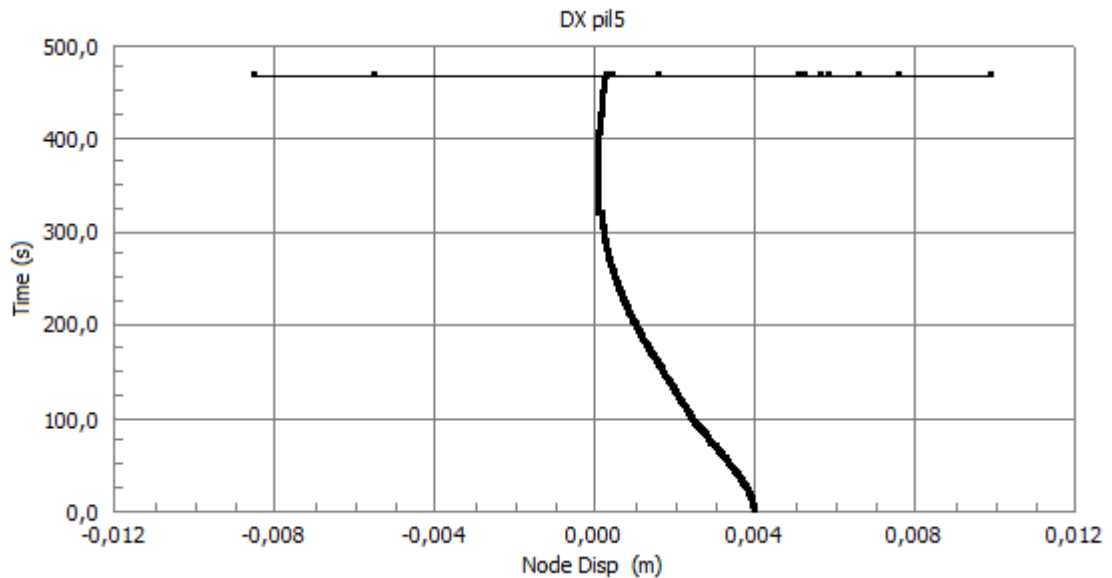
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p>
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p>
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p>

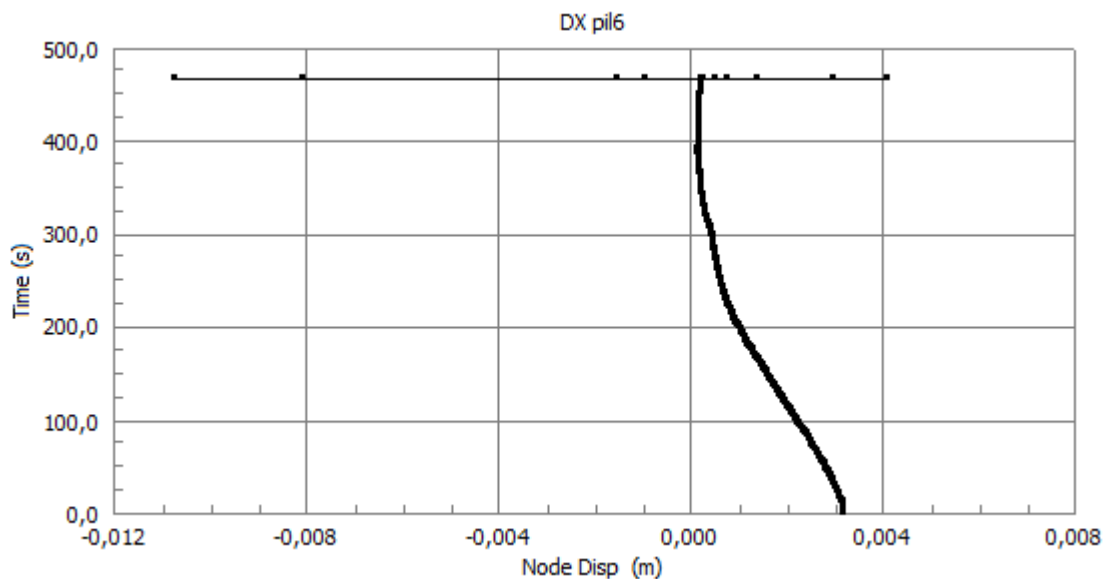
4



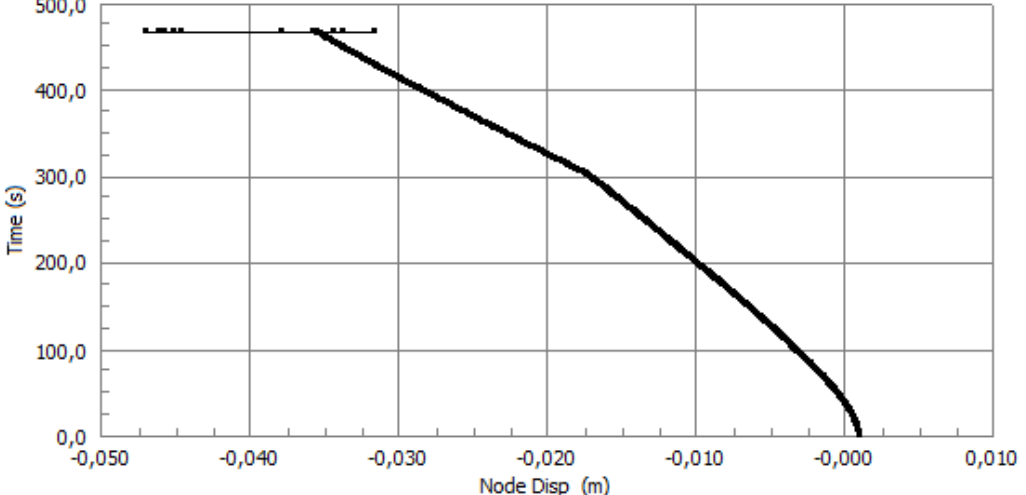
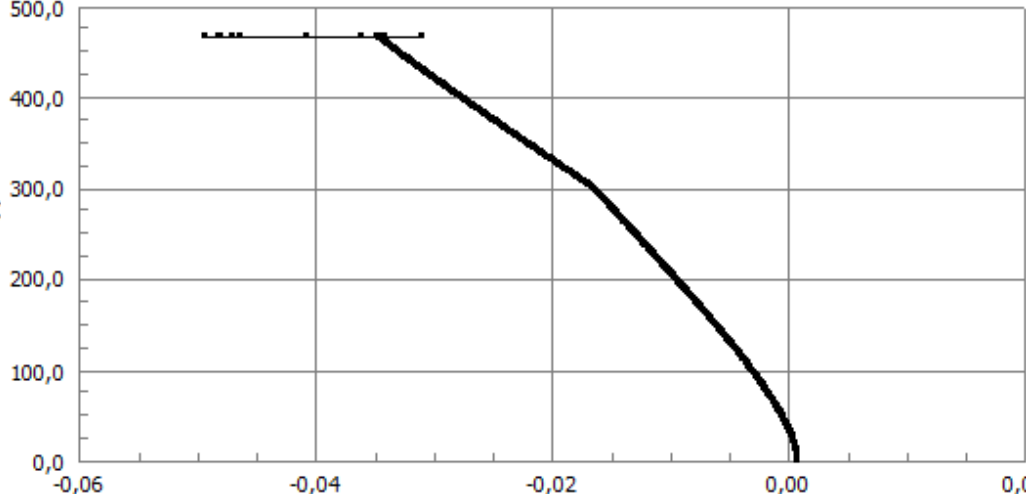
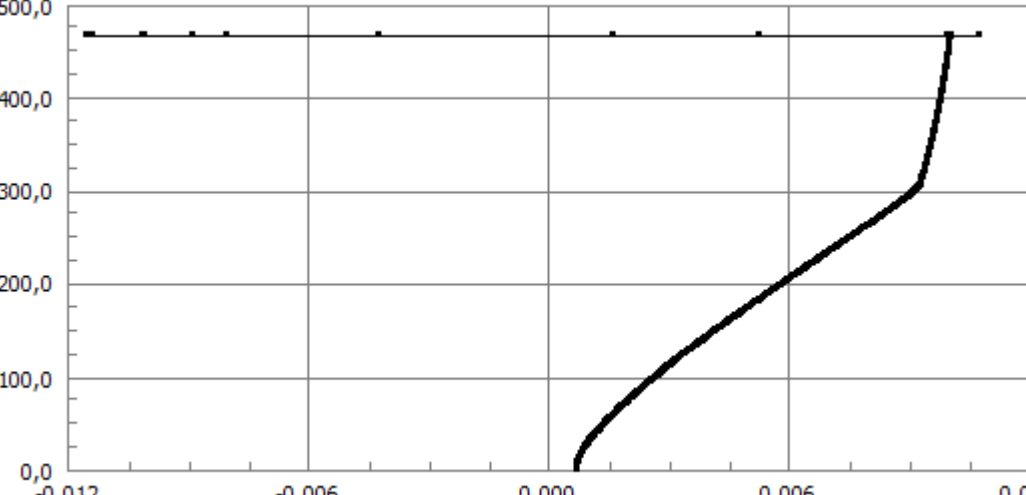
5



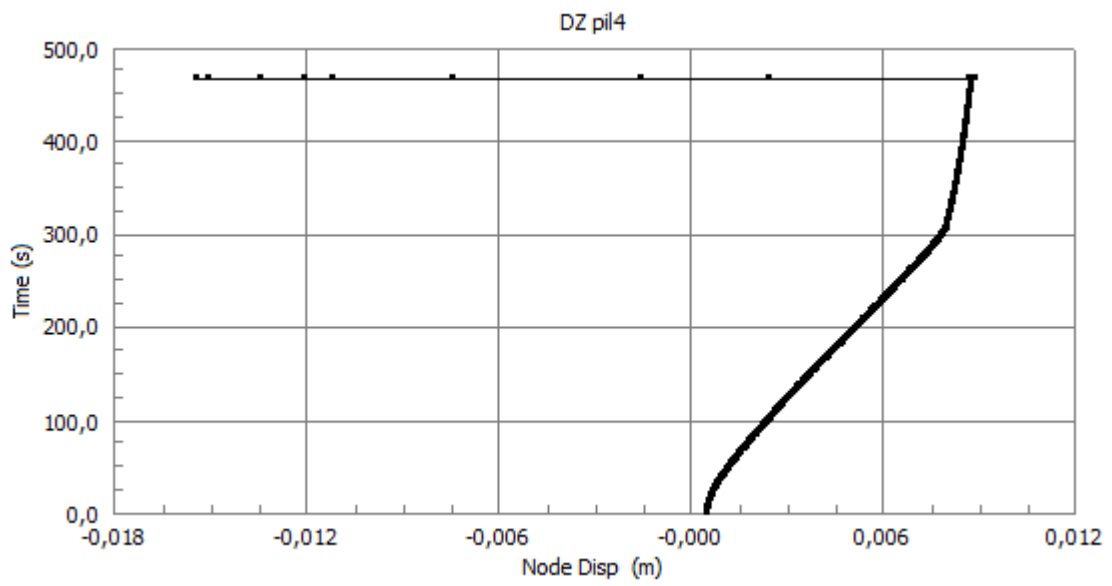
6



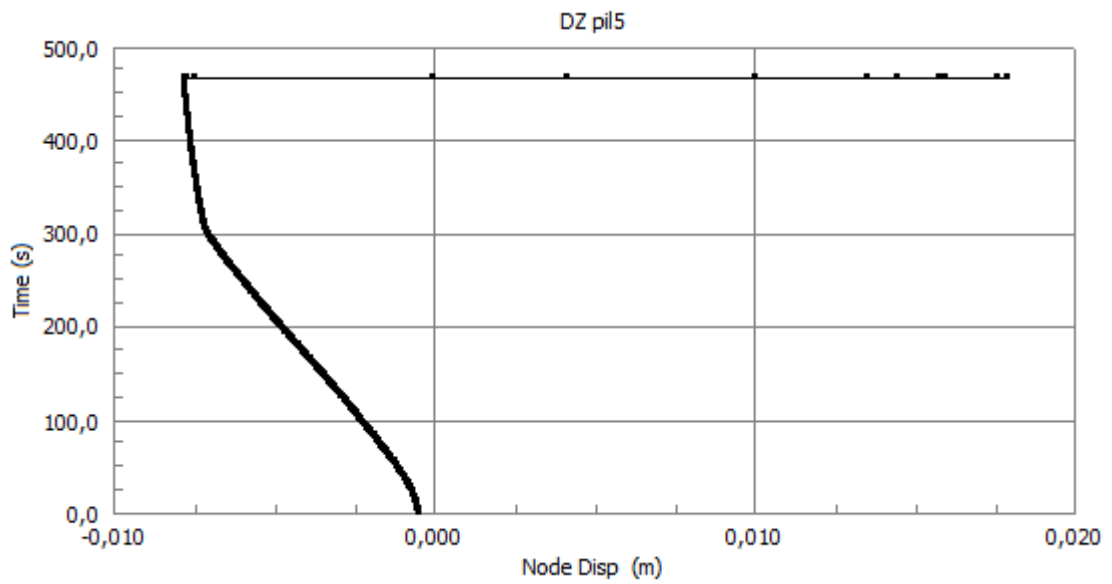
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p> 
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p> 
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p> 

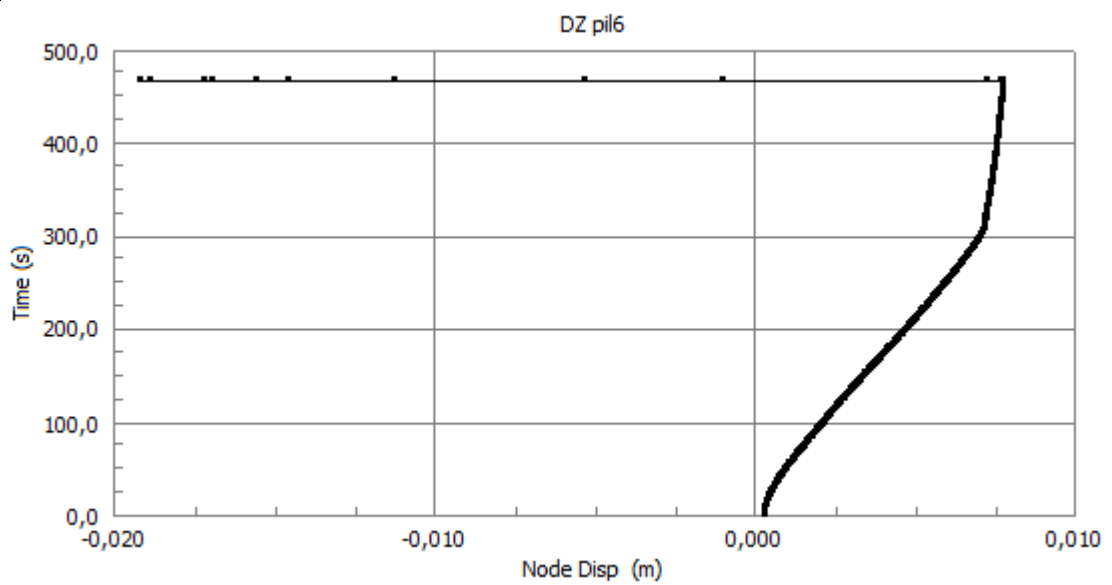
10



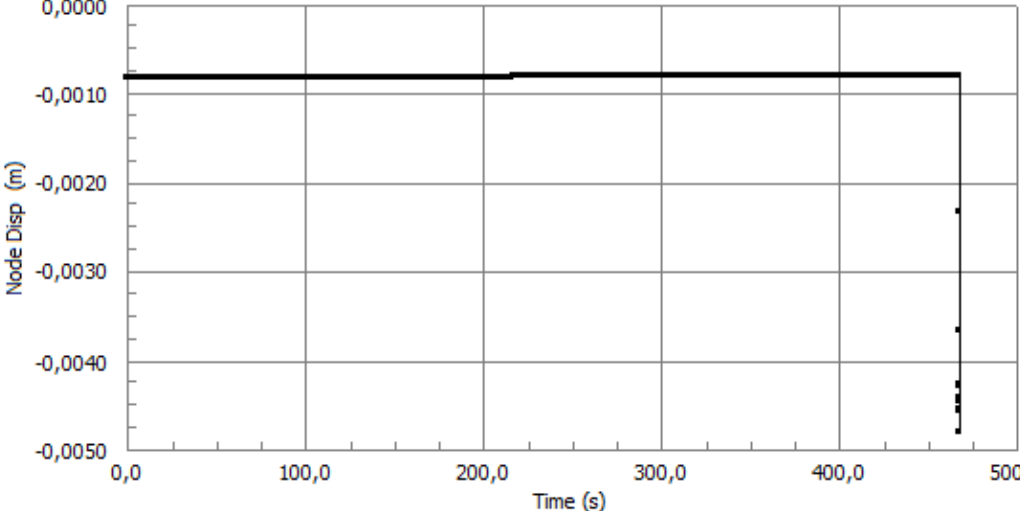
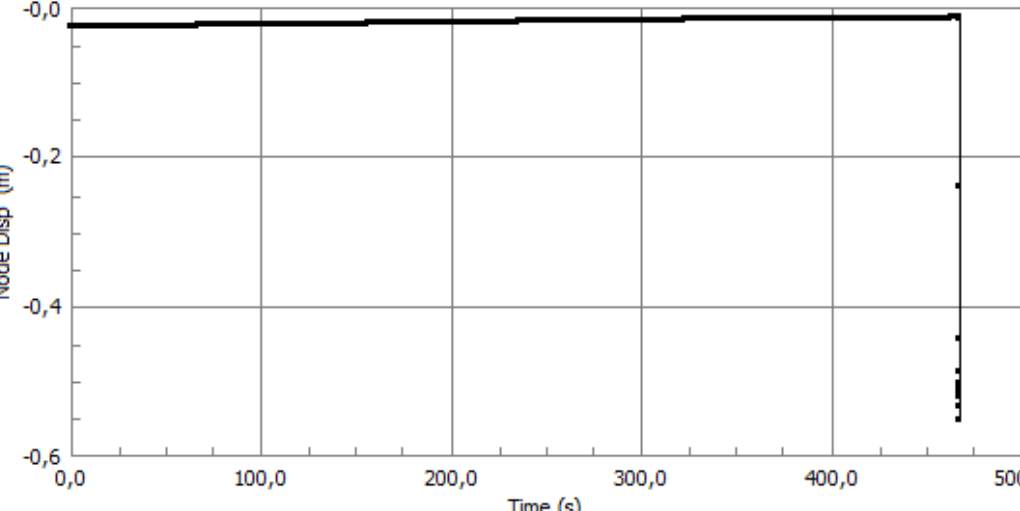
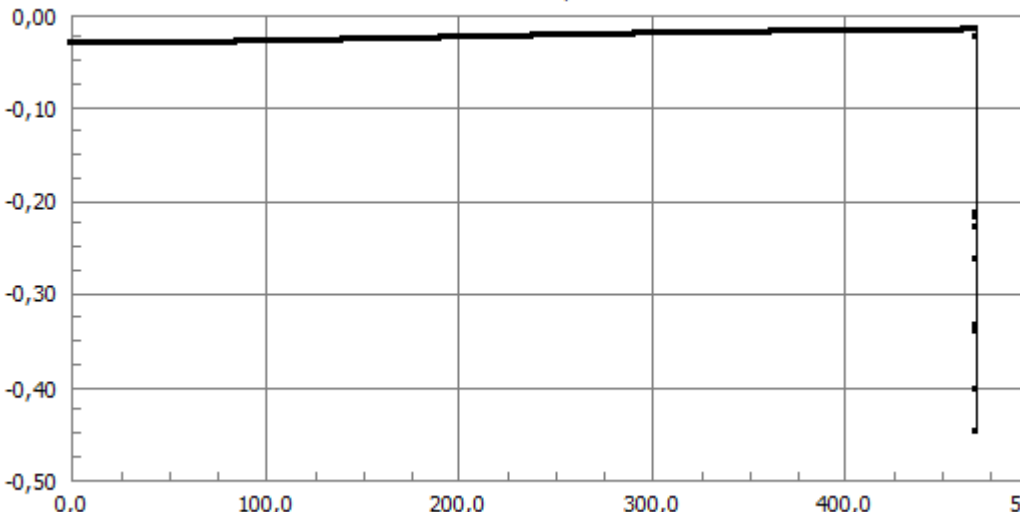
11



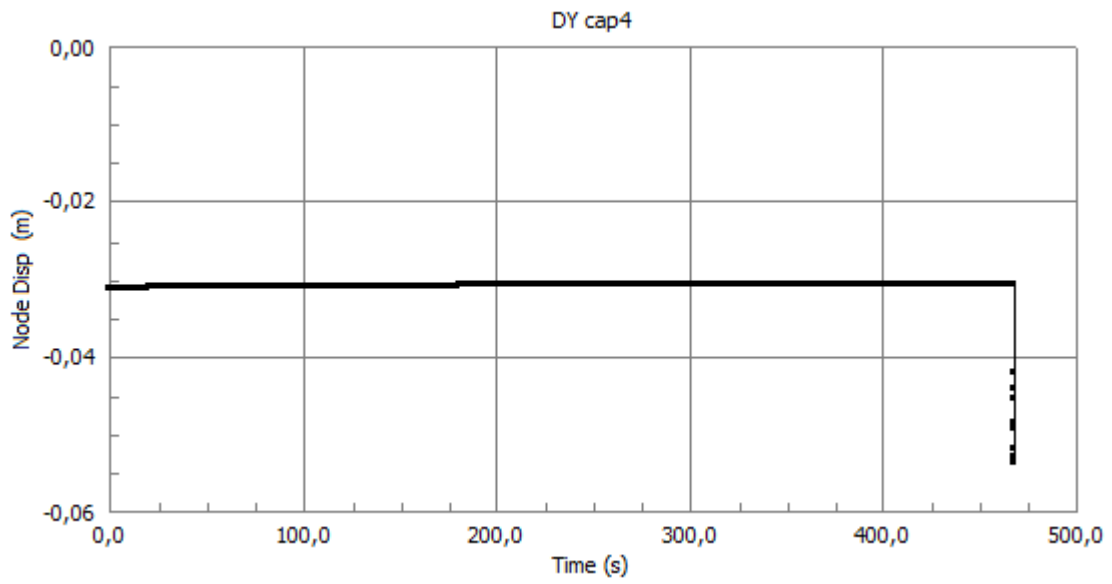
12



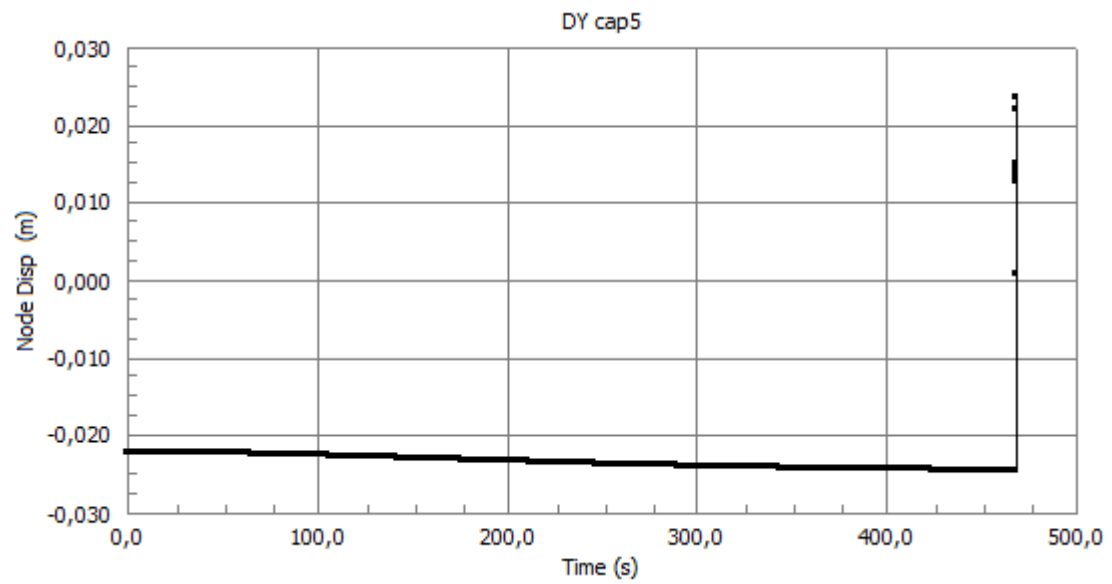
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>

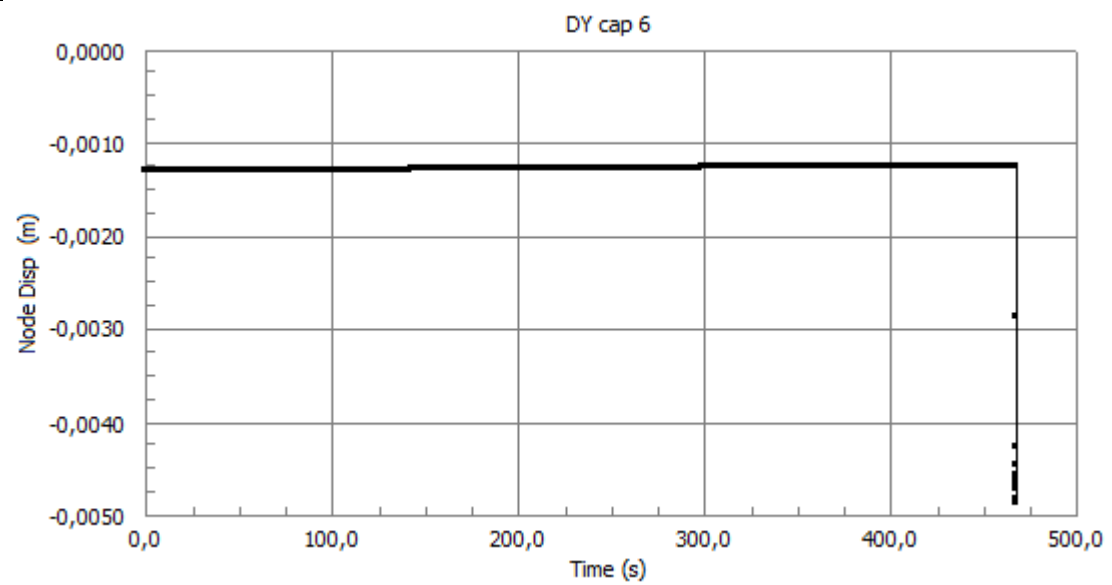
16



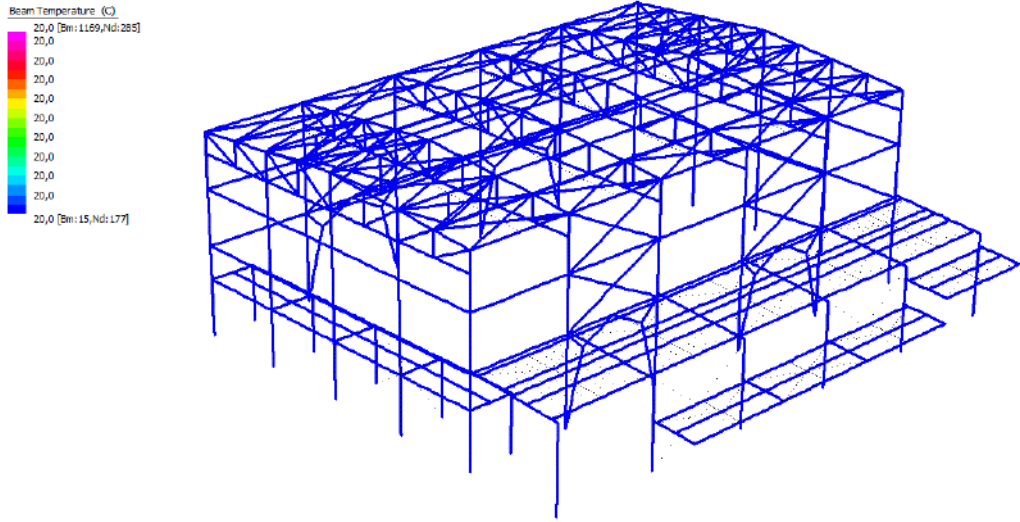
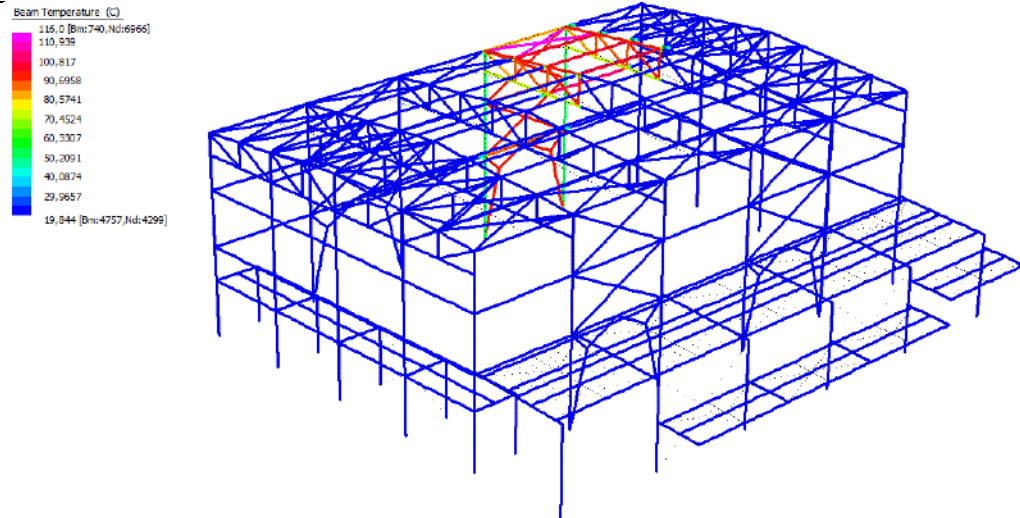
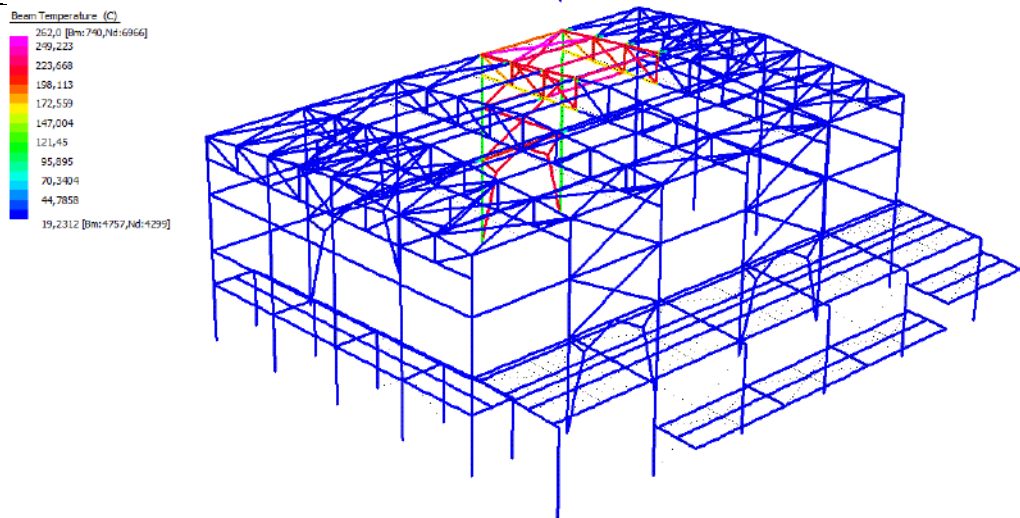
17



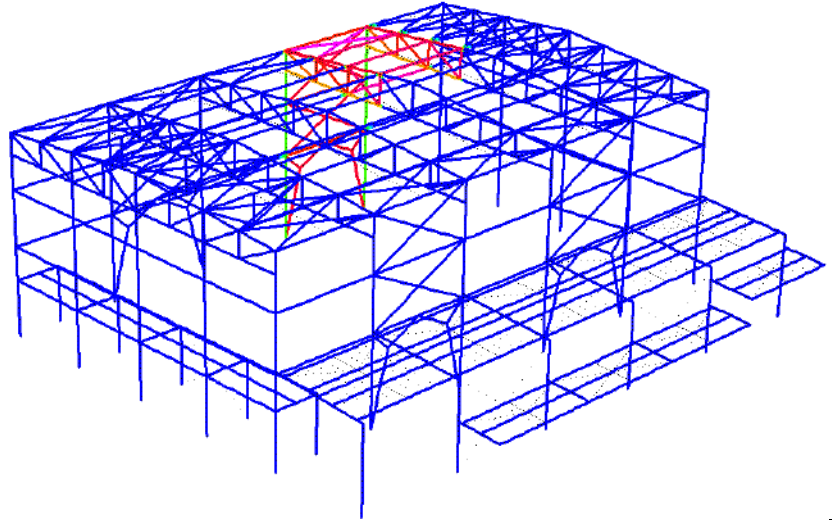
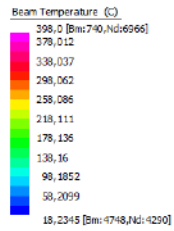
18



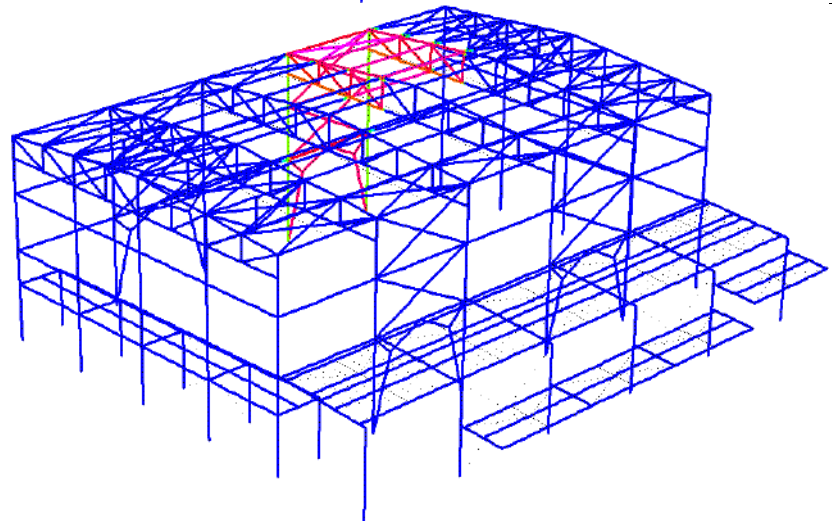
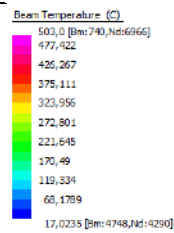
SCENARIO 1.2- STRUTTURA IMPERFETTA

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>20,0 [Bm: L169,Id:285]</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0 [Bm: L5,Id:177]</p>
100	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>116,0 [Bm:740,Id:6966]</p> <p>110,539</p> <p>100,817</p> <p>90,6958</p> <p>80,5741</p> <p>70,4524</p> <p>60,3307</p> <p>50,2091</p> <p>40,0874</p> <p>29,9657</p> <p>19,844 [Bm:4757,Id:4299]</p>
200	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>262,0 [Bm:740,Id:6966]</p> <p>249,223</p> <p>223,668</p> <p>198,113</p> <p>172,559</p> <p>147,004</p> <p>121,45</p> <p>95,895</p> <p>70,3404</p> <p>44,7858</p> <p>19,2312 [Bm:4757,Id:4299]</p>

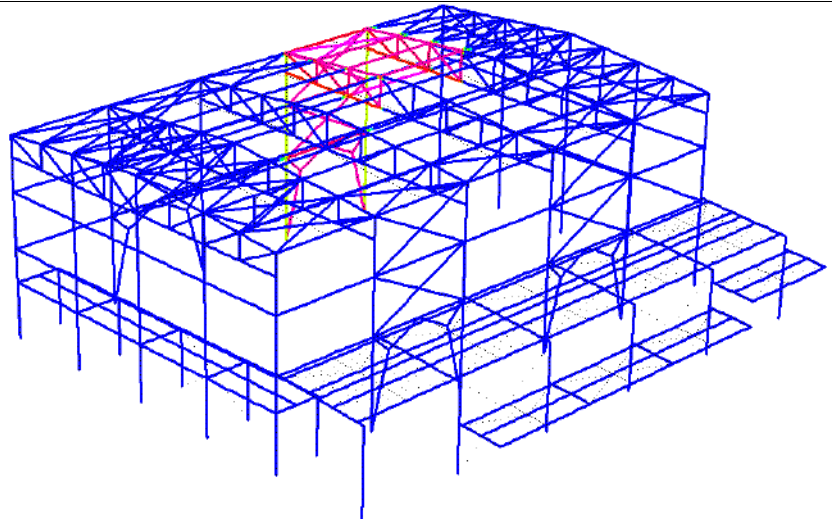
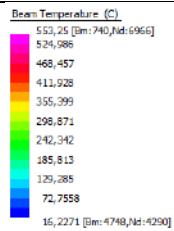
300



400



456

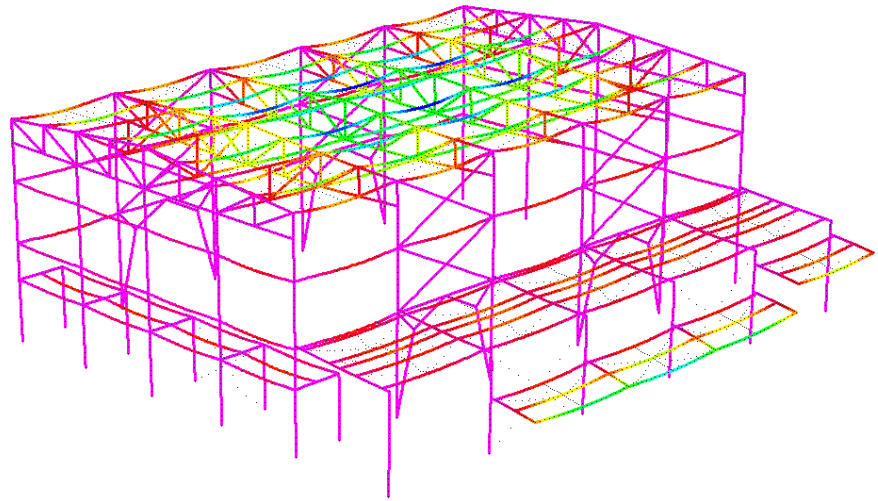
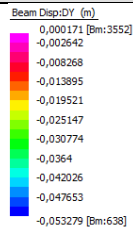


Analisi Meccanica

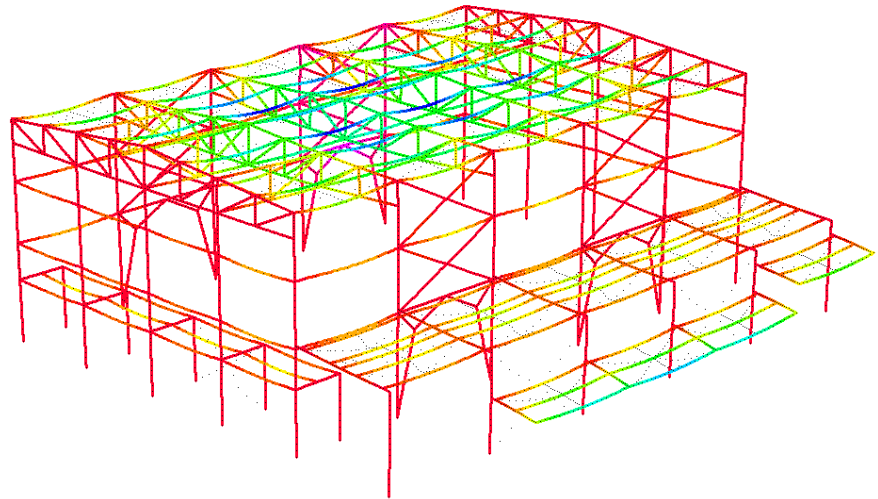
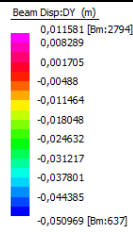
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

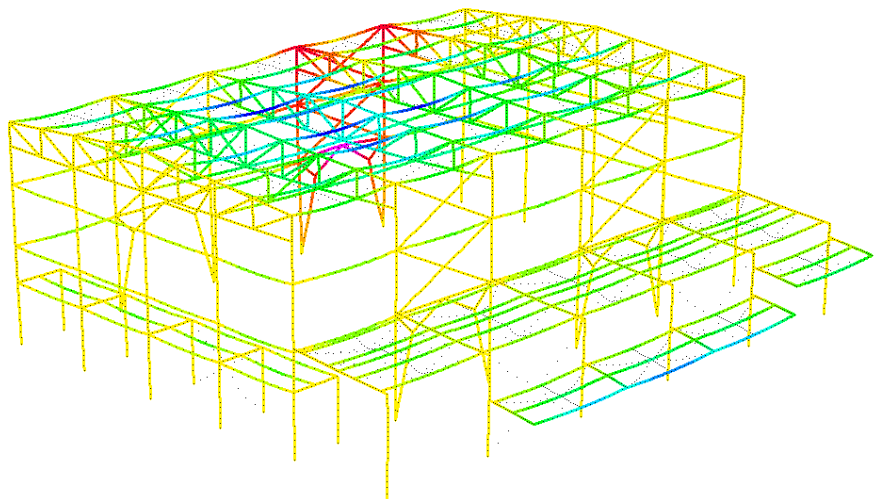
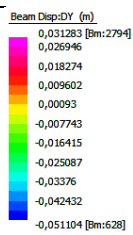
1



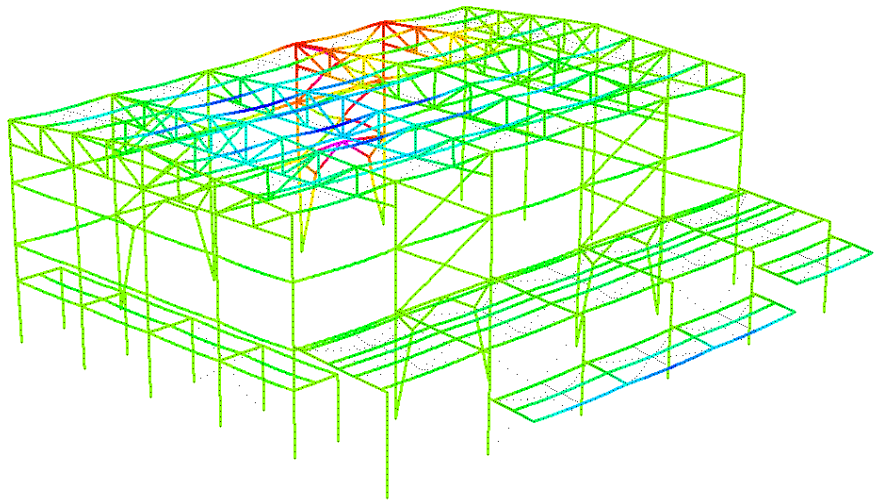
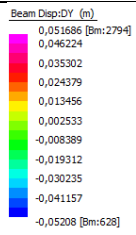
100



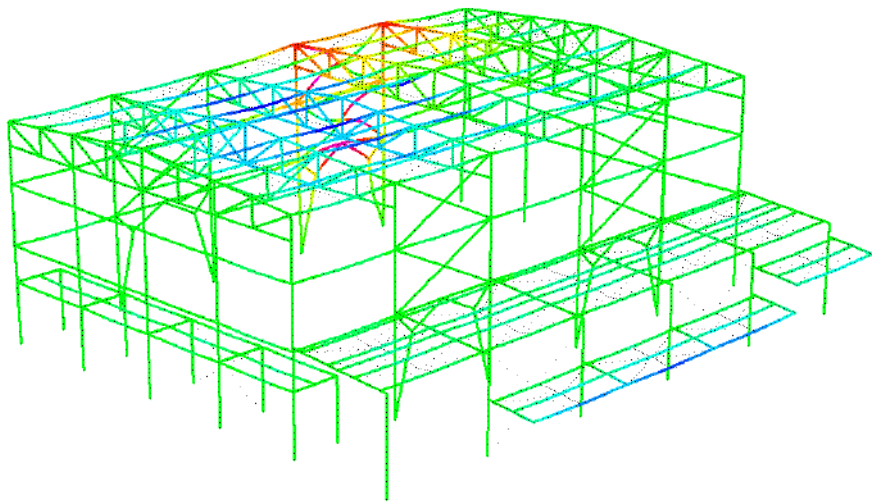
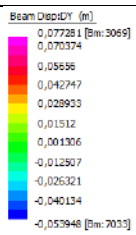
200



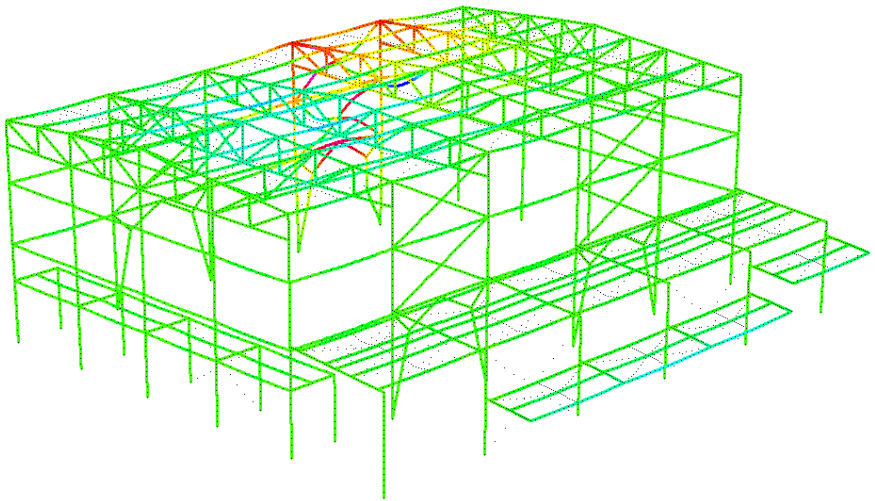
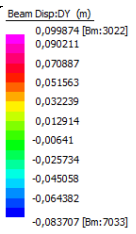
300



400



456



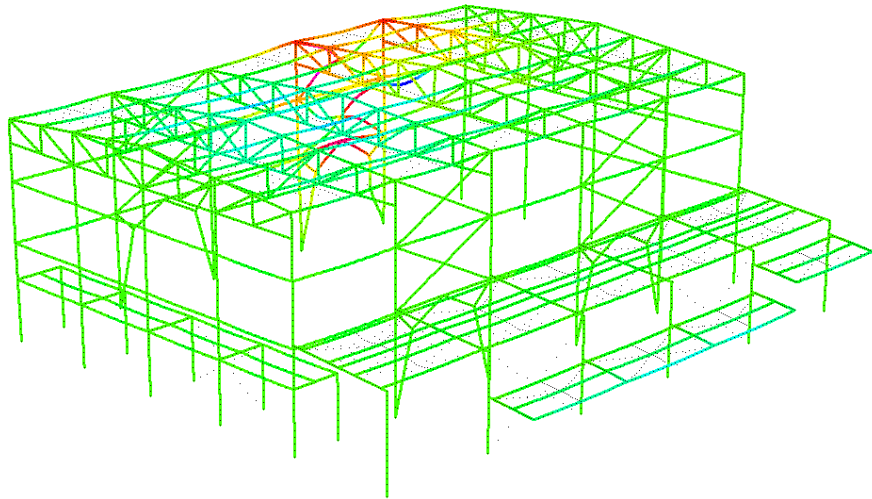
Analisi Meccanica

Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

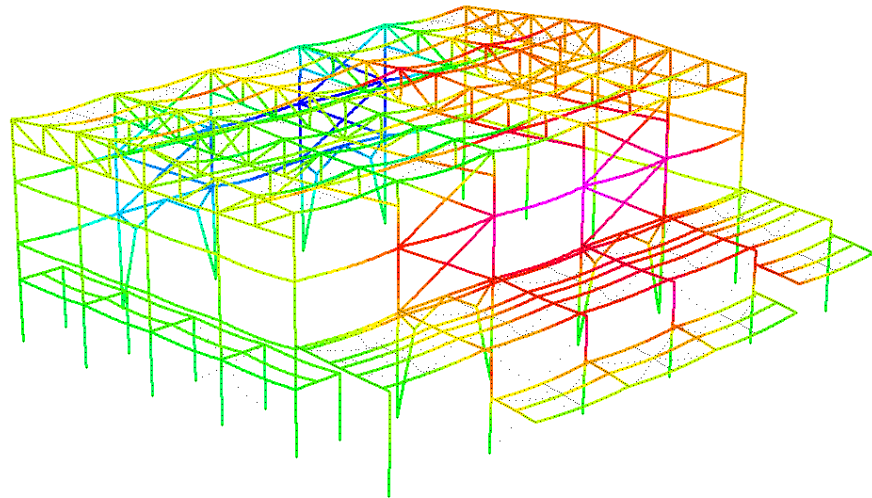
1

Beam Disp:DX (m)
0,099874 [Bm:3022]
0,090211
0,070887
0,051563
0,032239
0,012914
-0,00641
-0,025734
-0,045058
-0,064382
-0,083707 [Bm:7033]



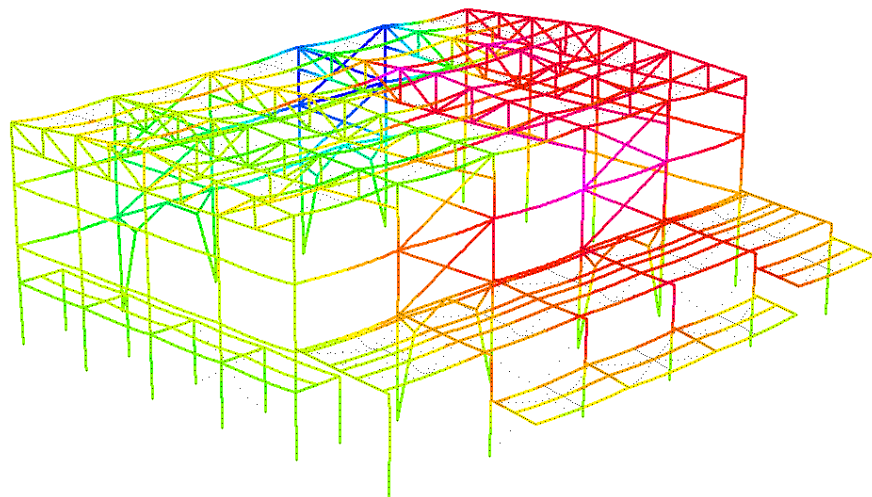
100

Beam Disp:DX (m)
0,010557 [Bm:3264]
0,009658
0,007901
0,006143
0,004386
0,002629
0,000871
-0,000886
-0,002643
-0,004401
-0,006158 [Bm:2631]

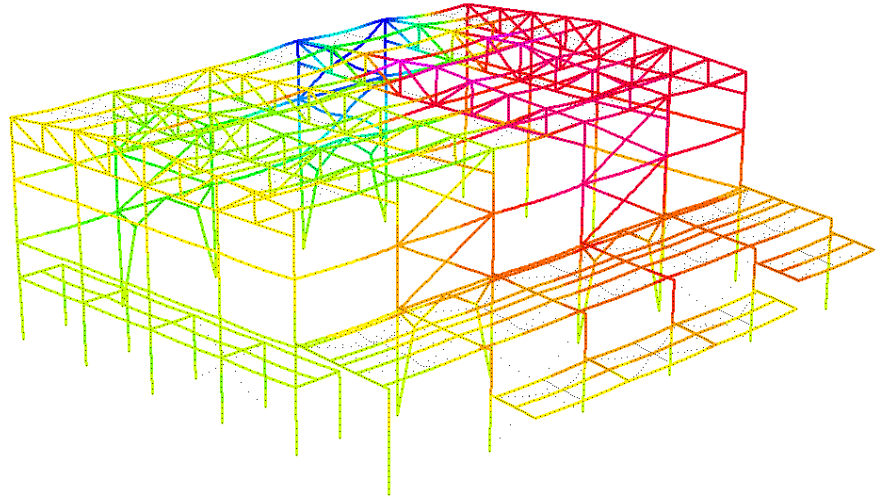
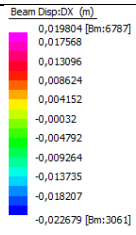


200

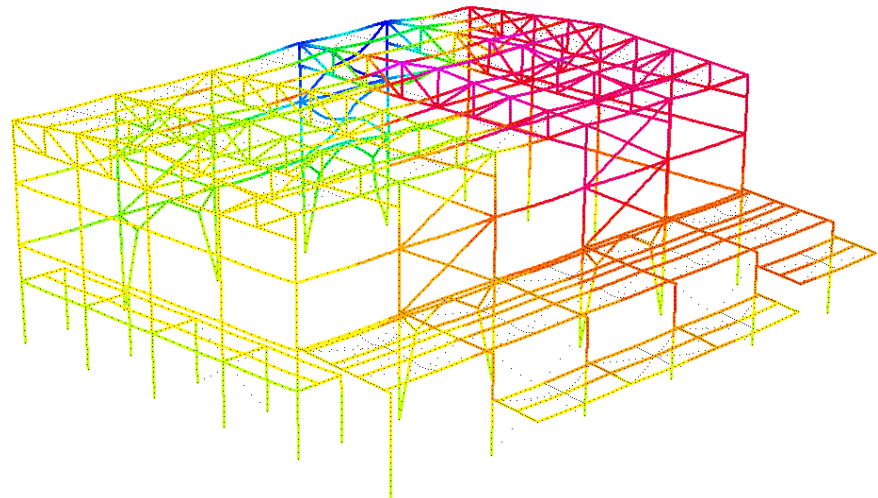
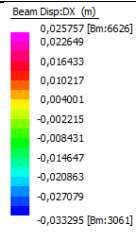
Beam Disp:DX (m)
0,013665 [Bm:6787]
0,012261
0,009453
0,006644
0,003836
0,001028
-0,00178
-0,004588
-0,007396
-0,010205
-0,013013 [Bm:3030]



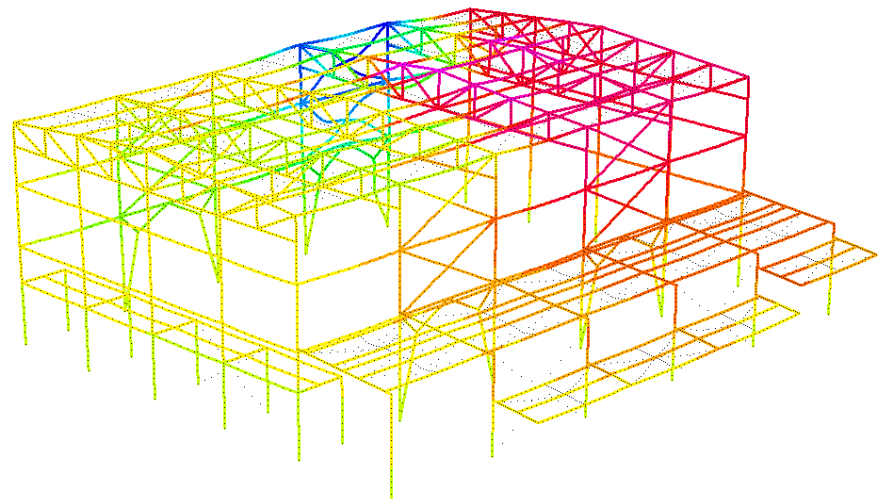
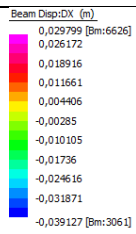
300



400



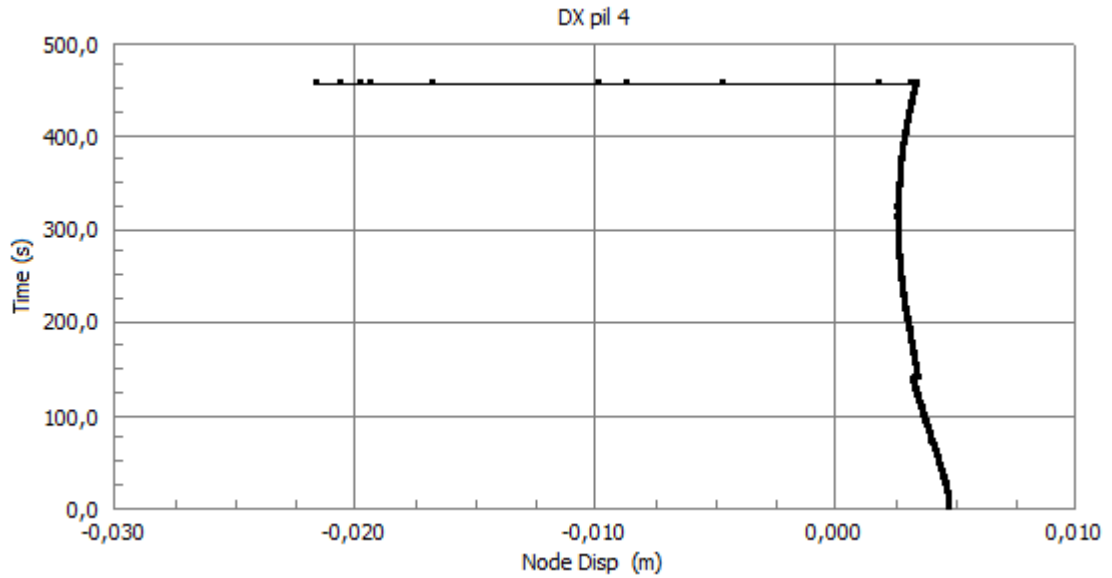
463



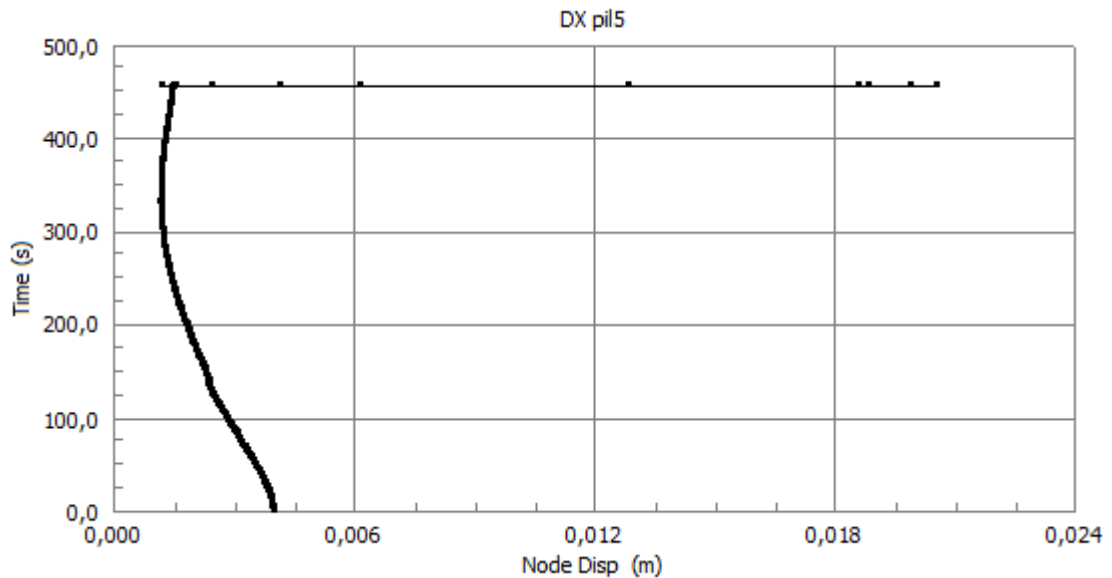
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
1	<p style="text-align: center;">DX pil1</p>
2	<p style="text-align: center;">DX pil2</p>
3	<p style="text-align: center;">DX pil3</p>

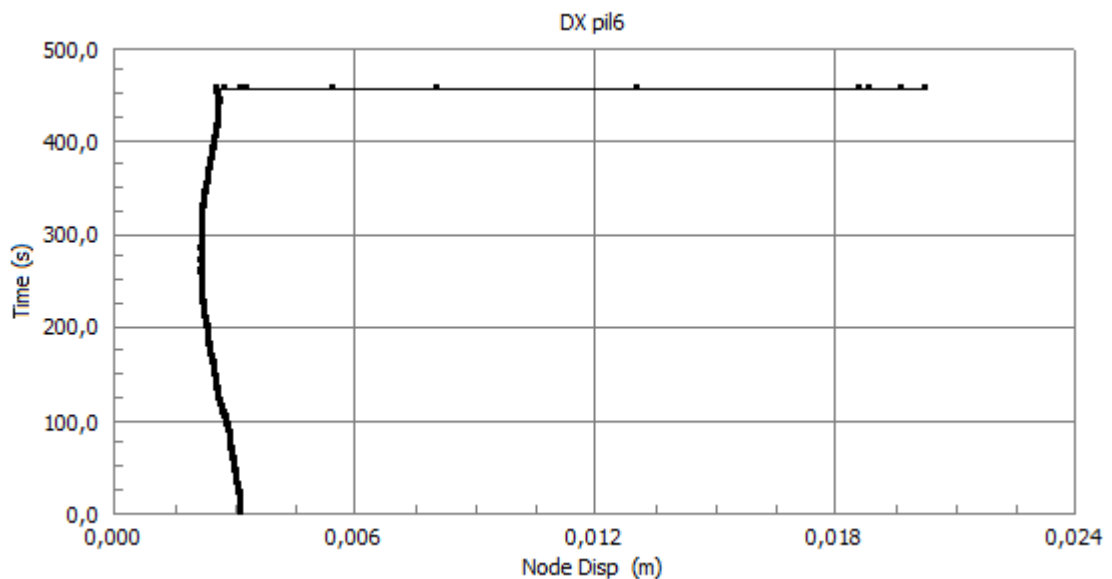
4



5



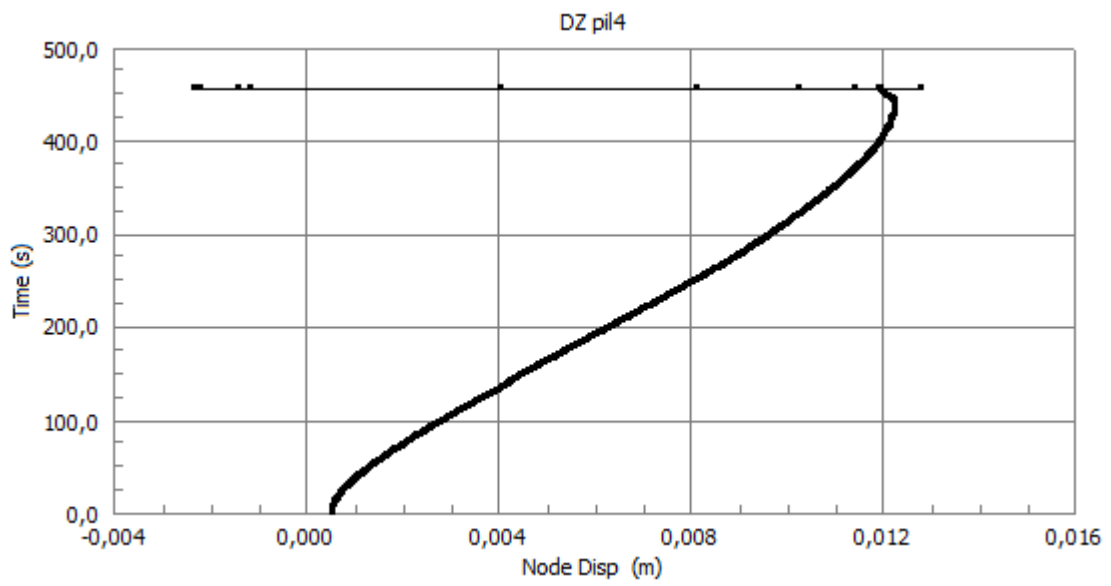
6



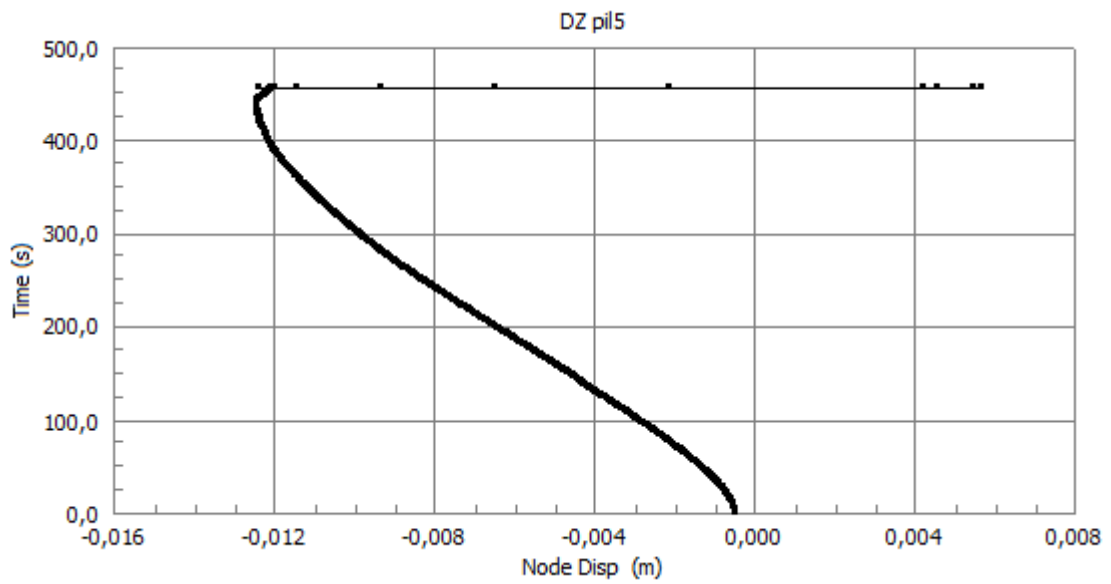
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p>

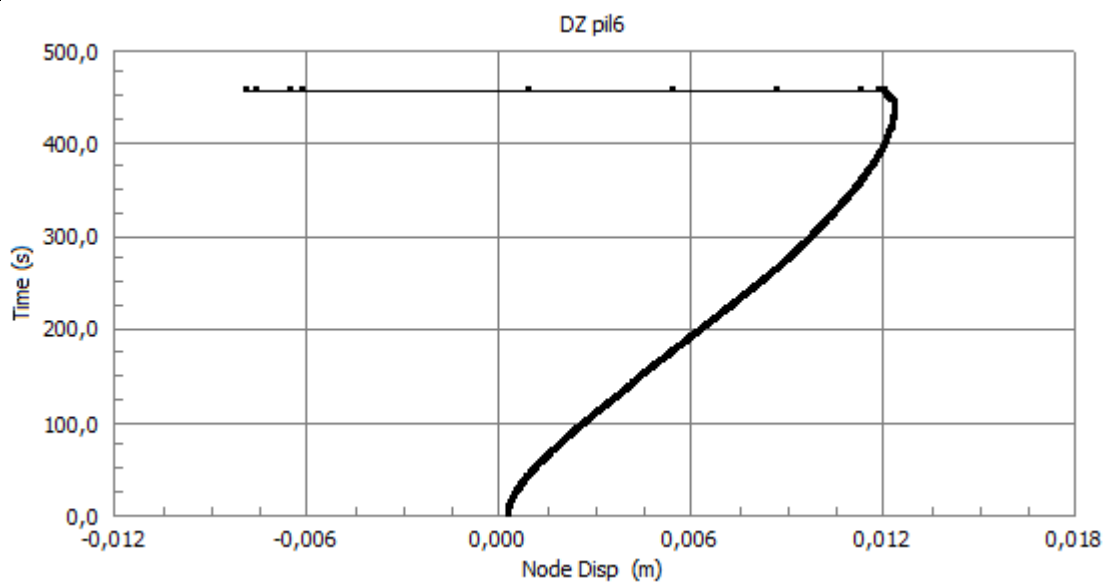
10



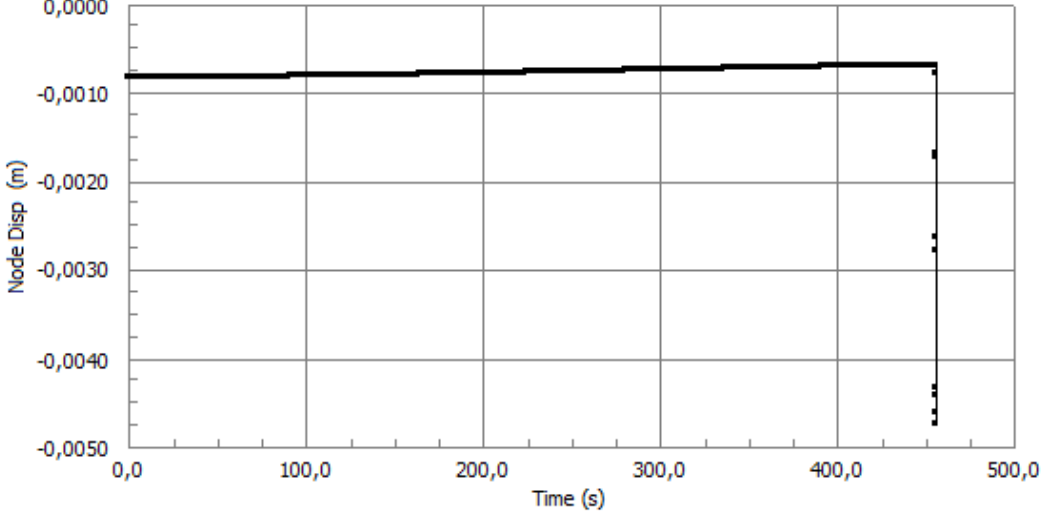
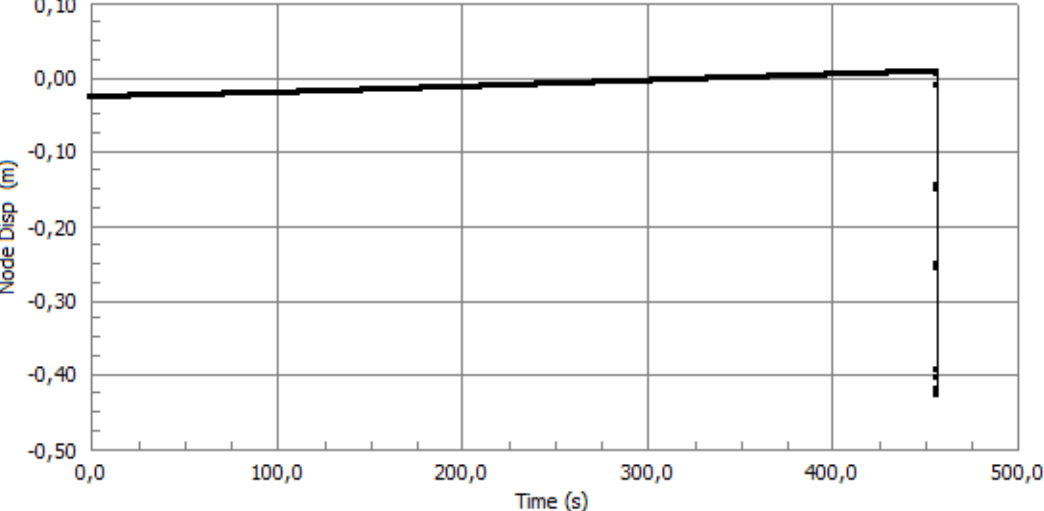
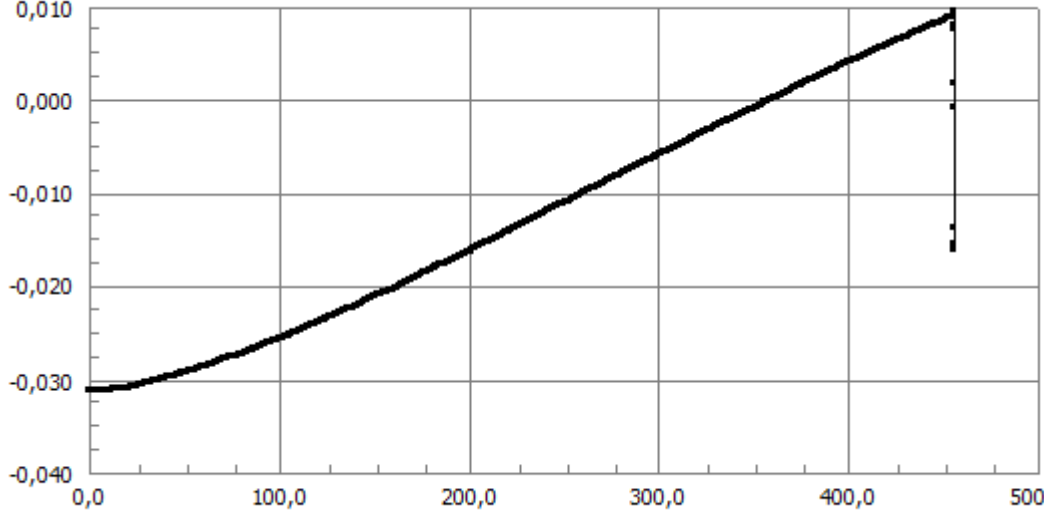
11



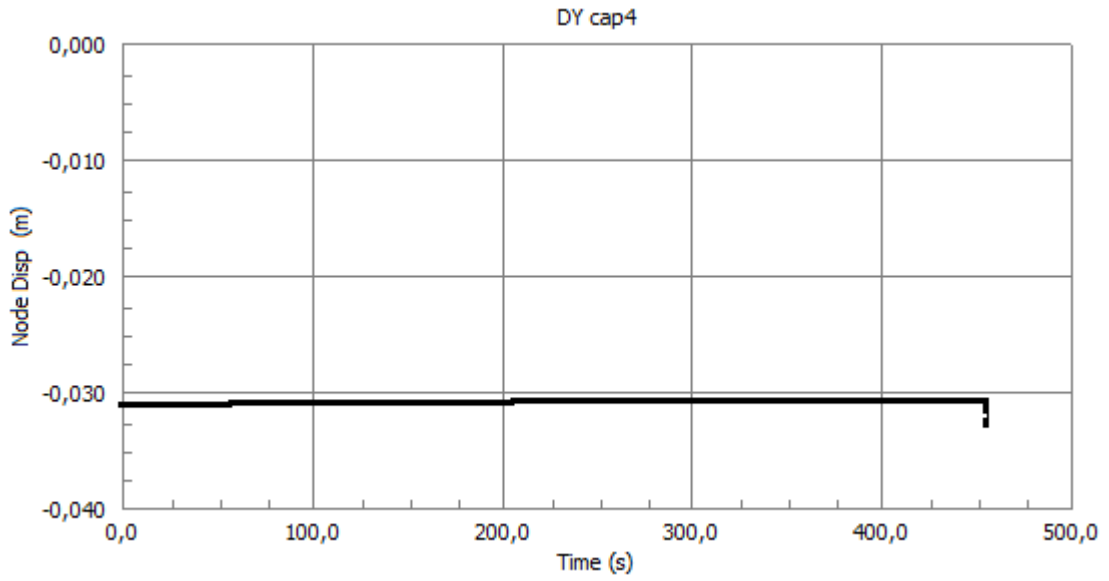
12



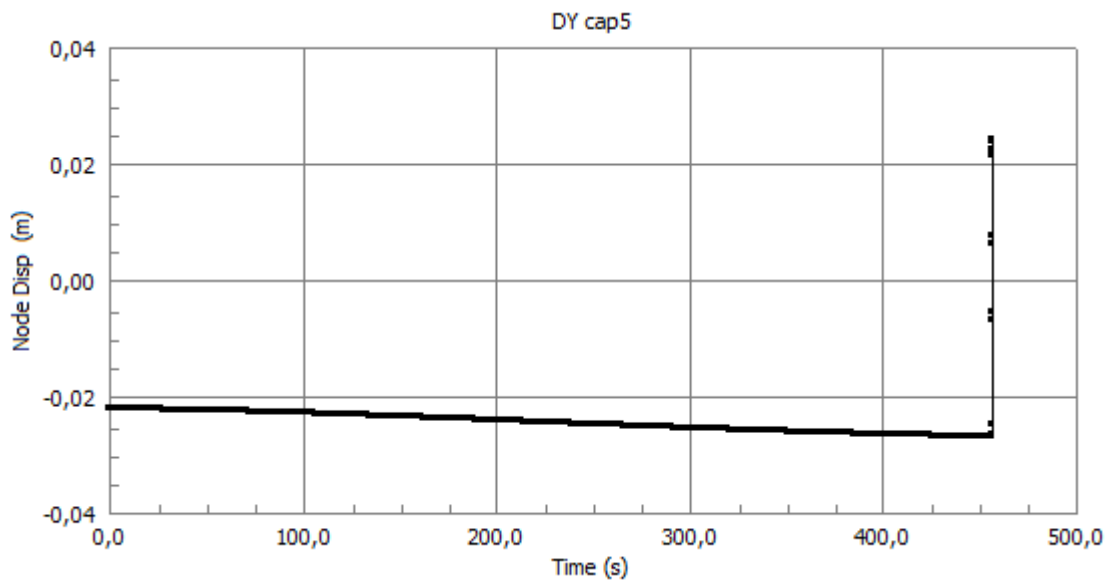
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>

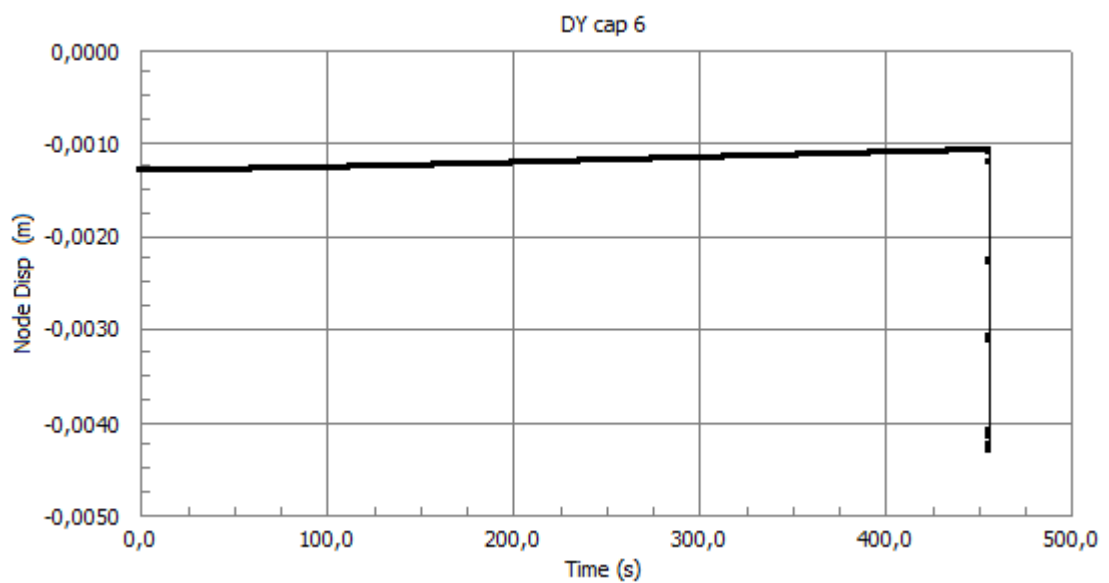
16



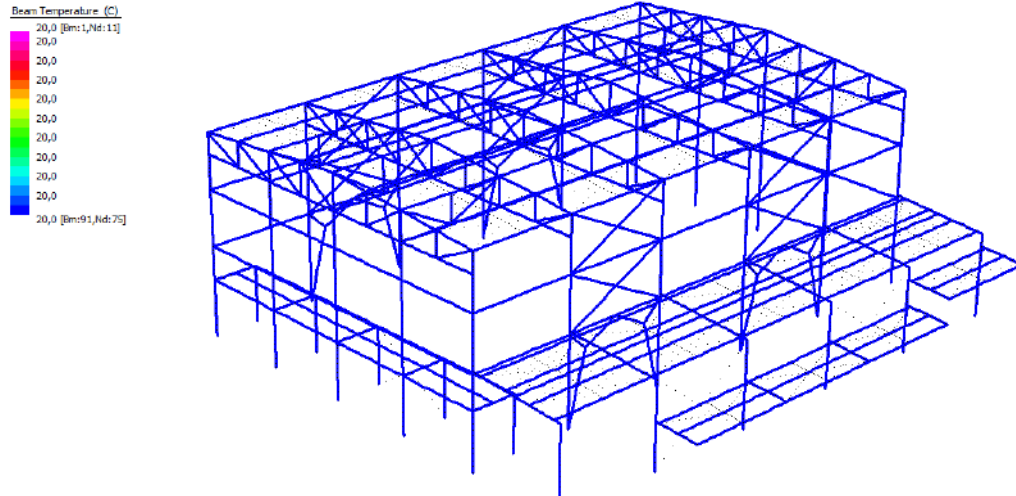
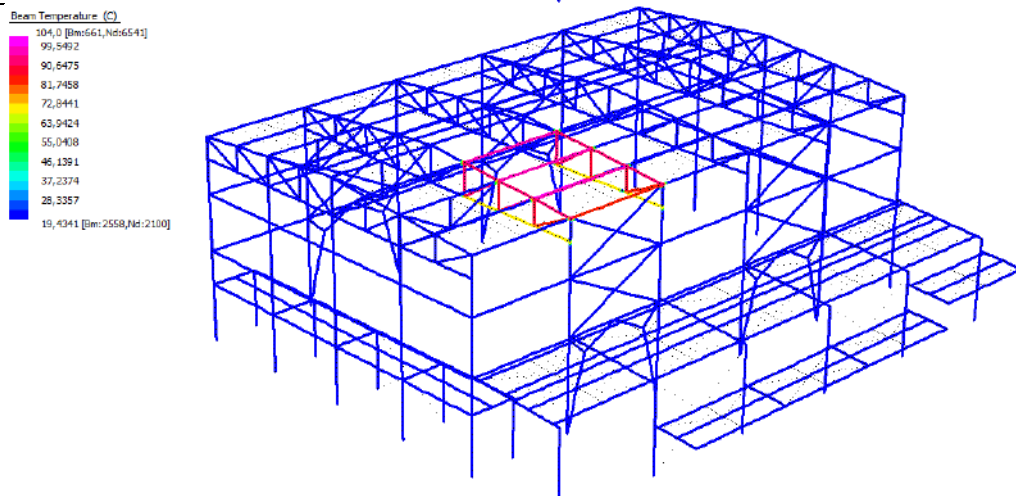
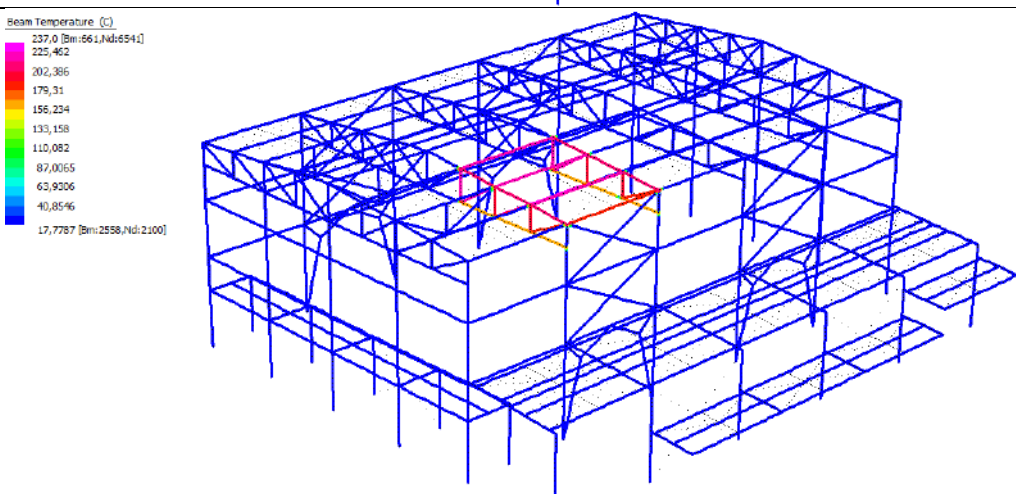
17



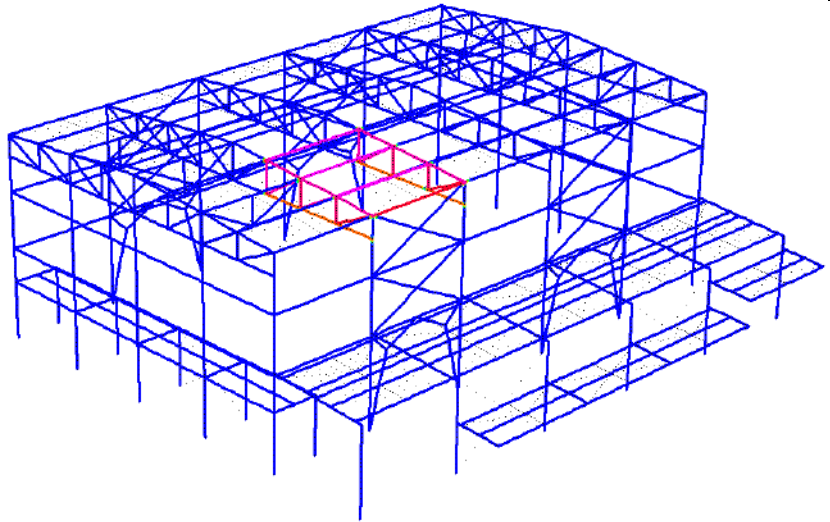
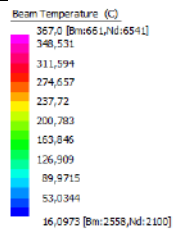
18



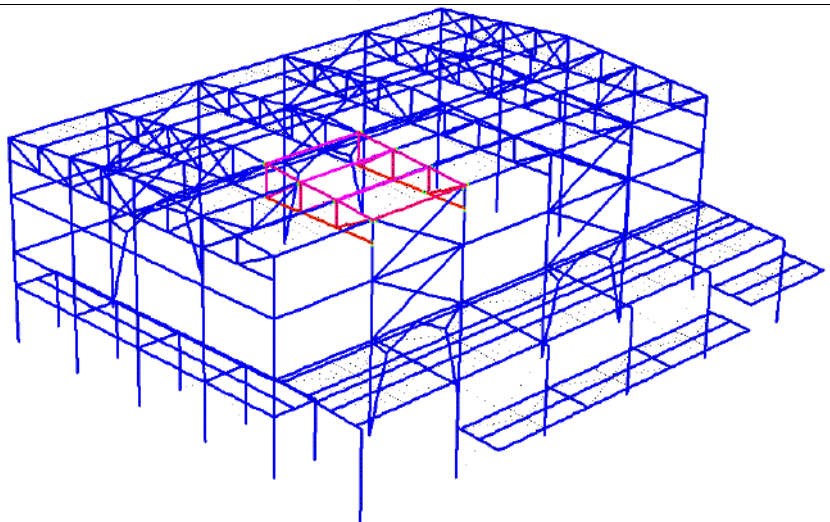
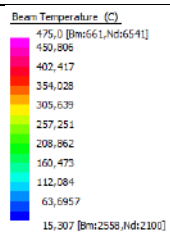
SCENARIO 2.1– STRUTTURA IMPERFETTA

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>20,0 [Bm:1,Nd:11]</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0 [Bm:91,Nd:75]</p>
100	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>104,0 [Bm:661,Nd:6541]</p> <p>99,5492</p> <p>90,6475</p> <p>81,7458</p> <p>72,8441</p> <p>63,9424</p> <p>55,0408</p> <p>46,1391</p> <p>37,2374</p> <p>28,3357</p> <p>19,4341 [Bm:2558,Nd:2100]</p>
200	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>237,0 [Bm:661,Nd:6541]</p> <p>225,462</p> <p>202,386</p> <p>179,31</p> <p>156,234</p> <p>133,158</p> <p>110,082</p> <p>87,0065</p> <p>63,9306</p> <p>40,8546</p> <p>17,7787 [Bm:2558,Nd:2100]</p>

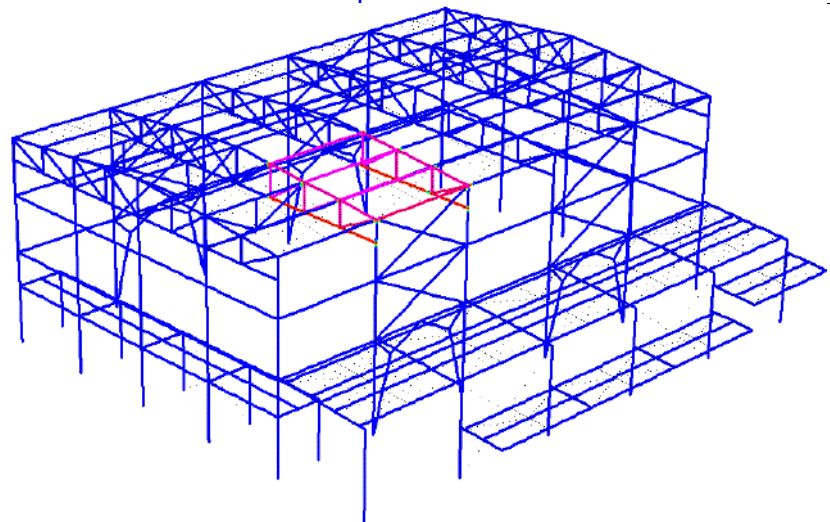
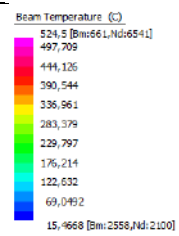
300



400



458

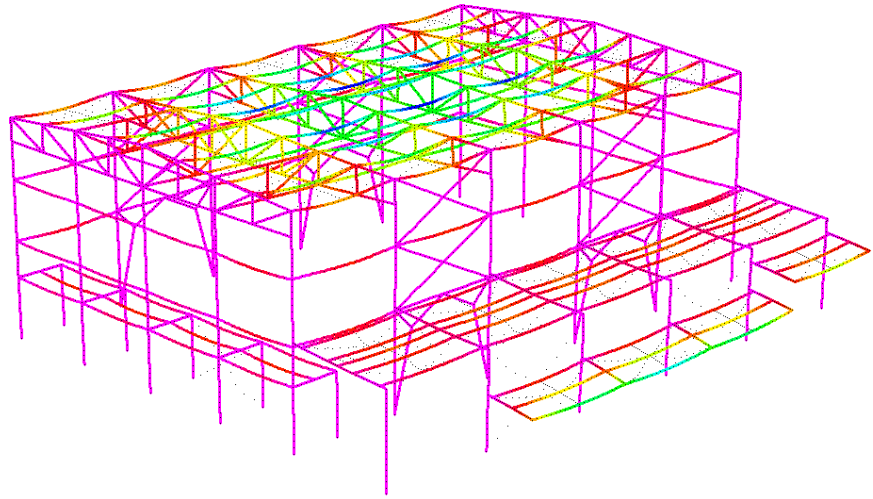
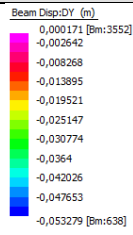


Analisi Meccanica

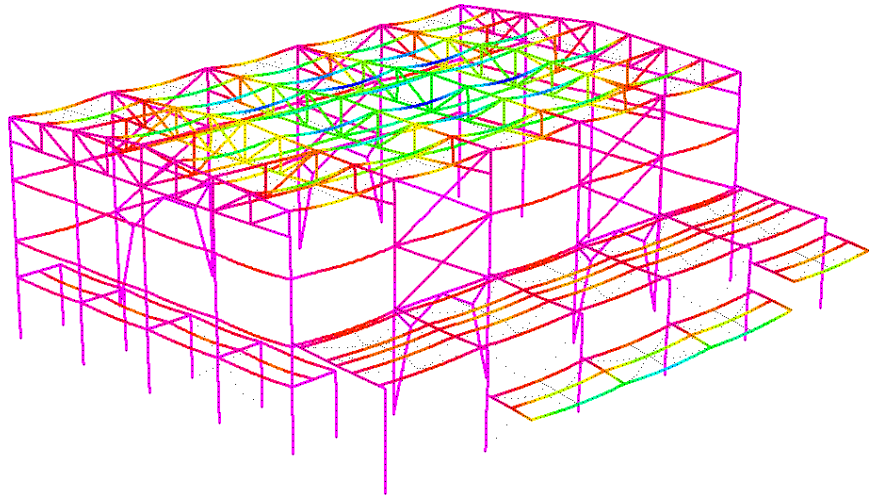
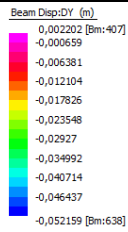
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

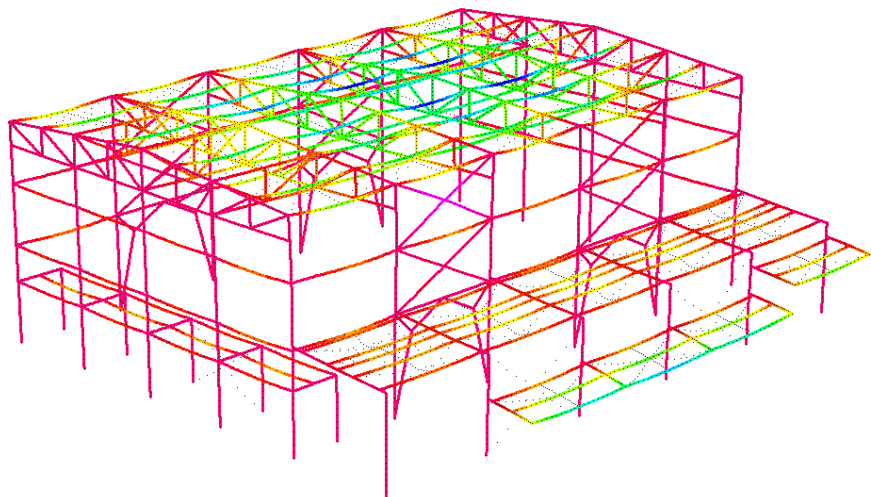
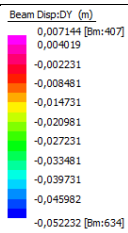
1



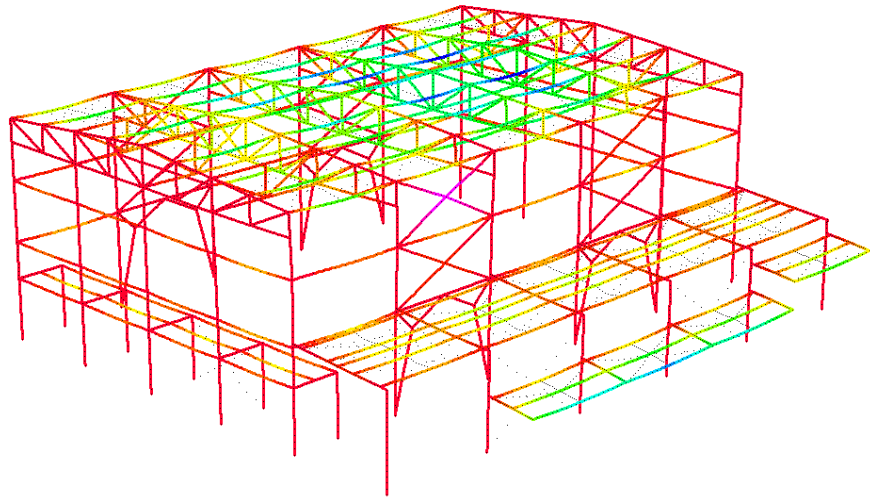
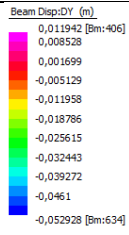
100



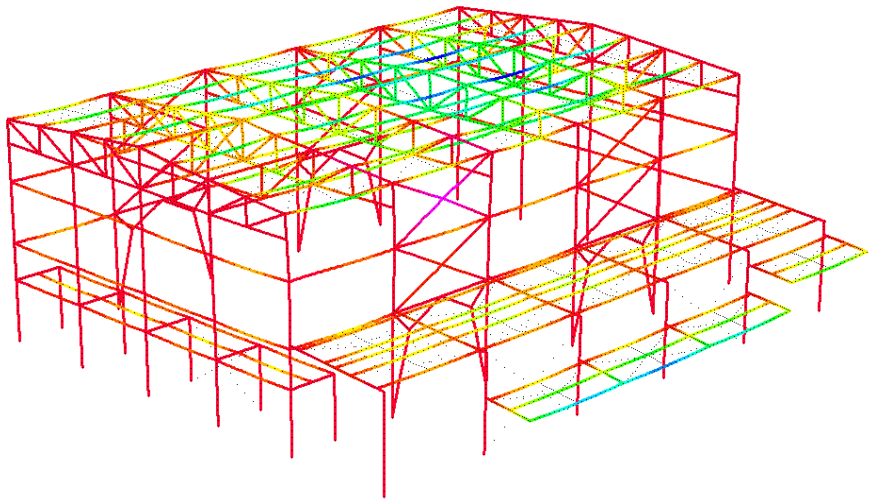
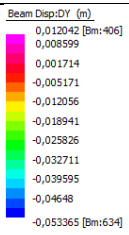
200



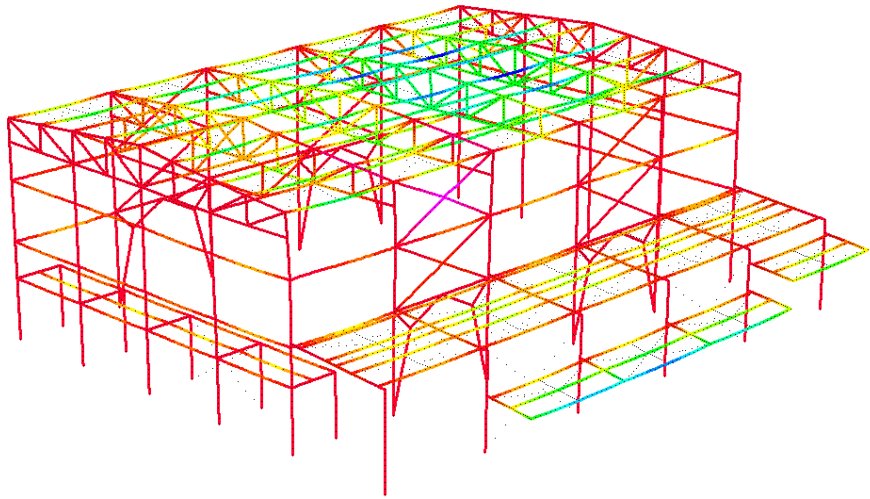
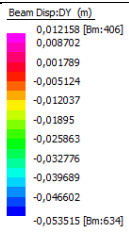
300



400



458

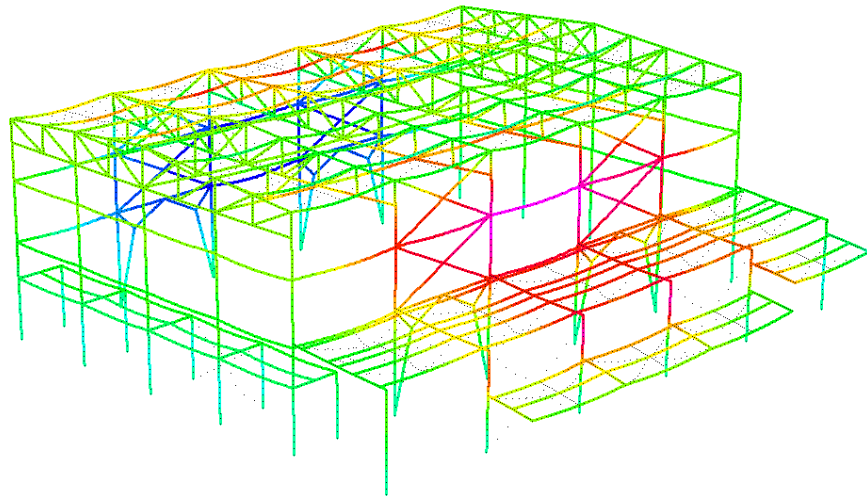
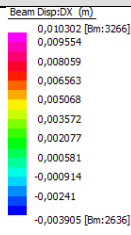


Analisi Meccanica

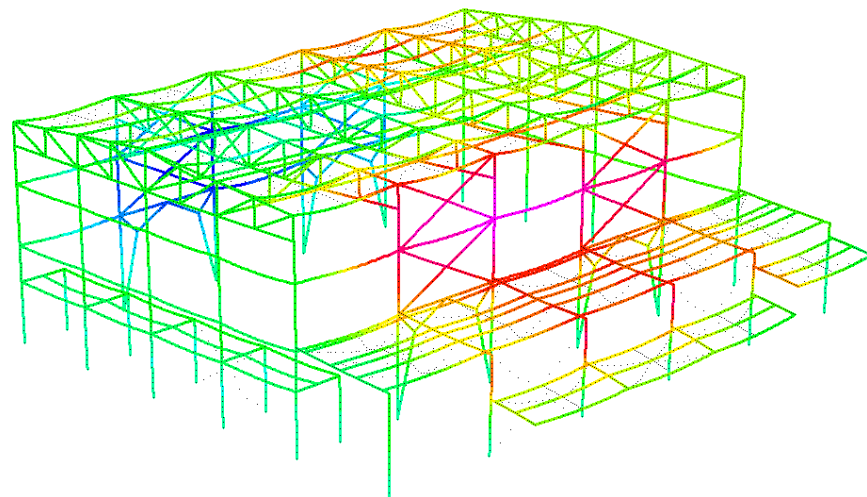
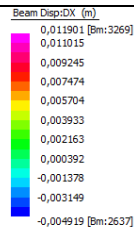
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

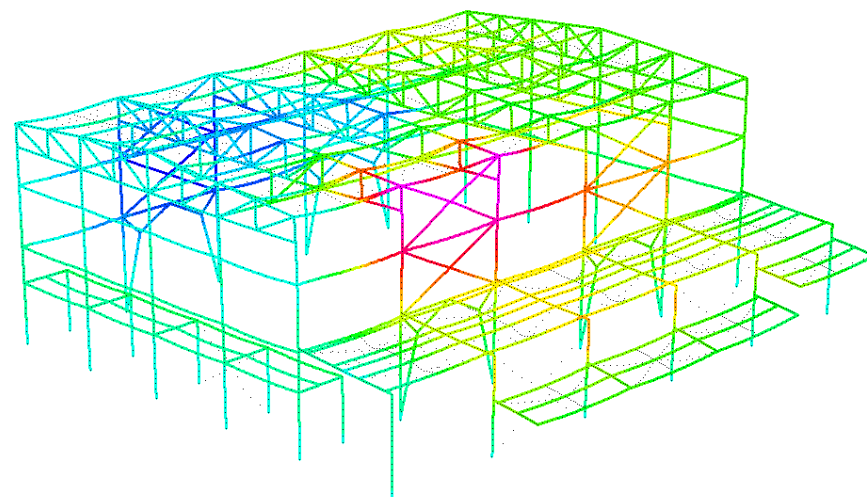
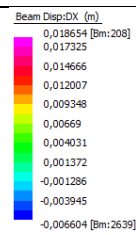
1



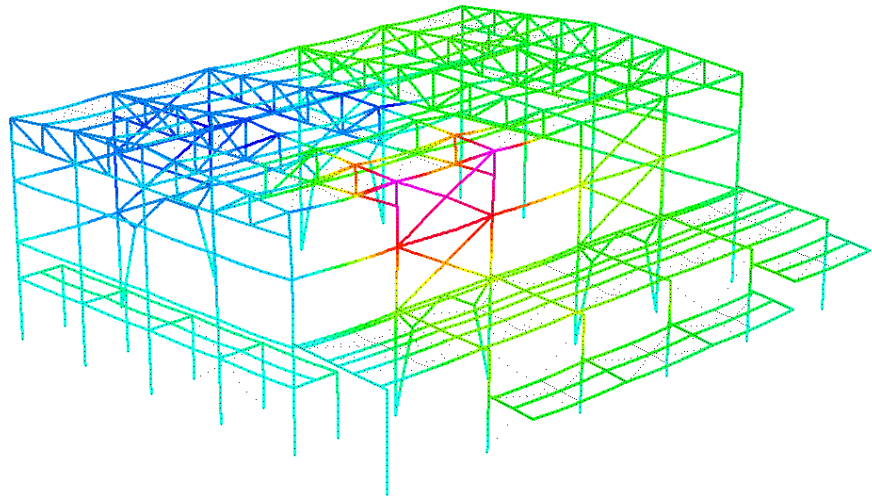
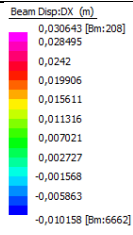
100



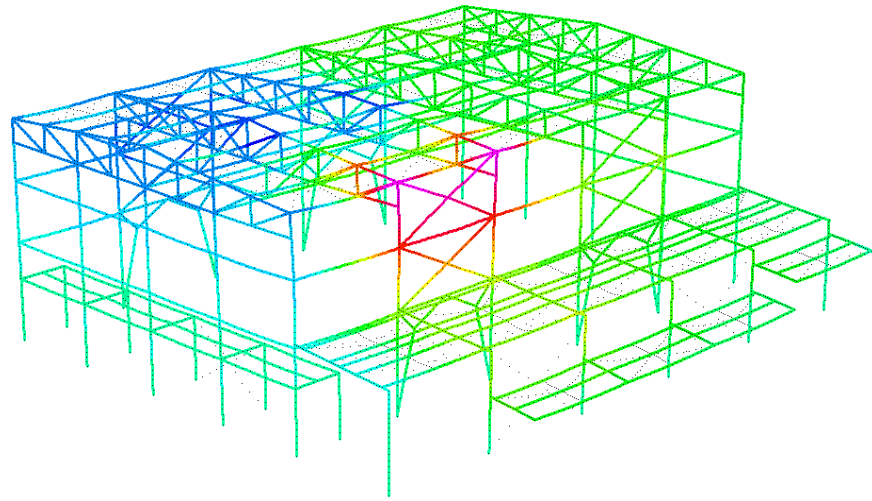
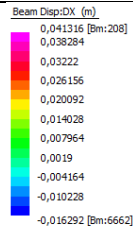
200



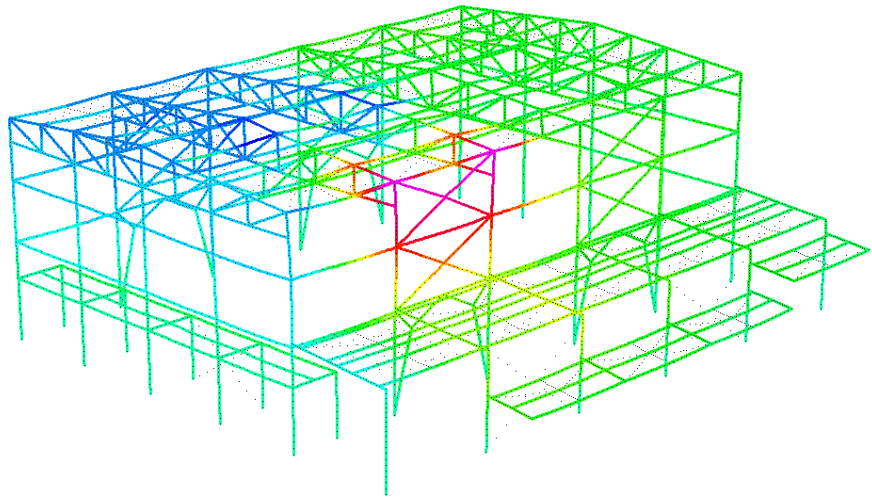
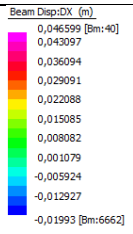
300



400



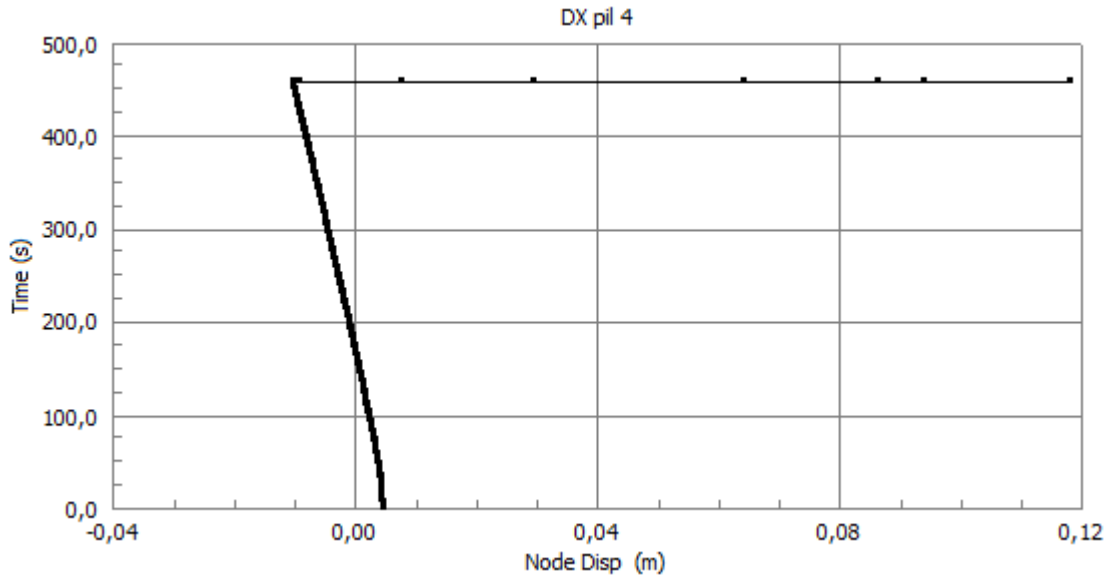
458



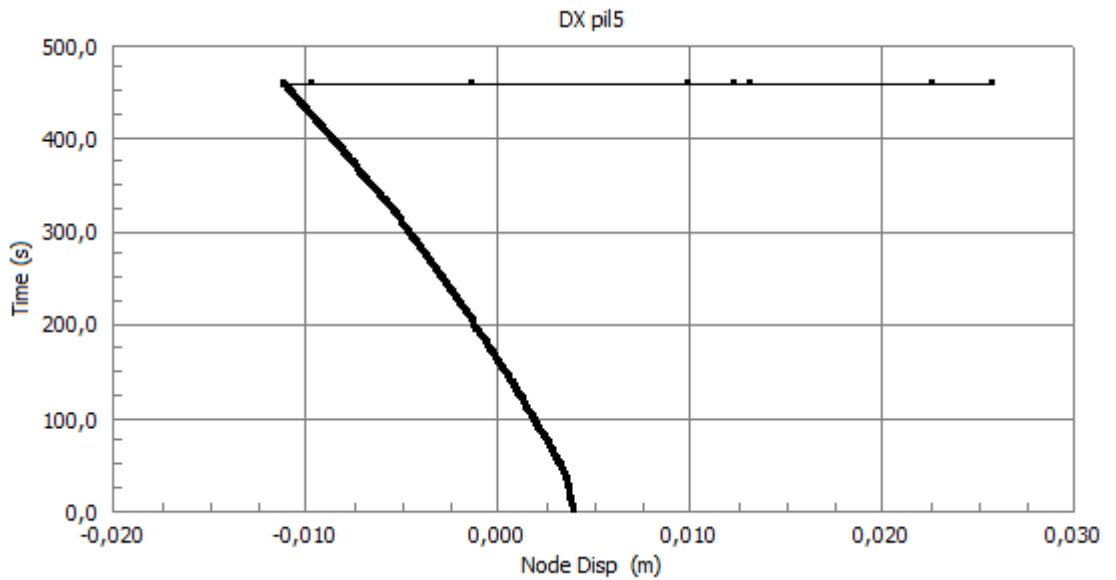
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
<p>1</p>	<p style="text-align: center;">DX pil1</p>
<p>2</p>	<p style="text-align: center;">DX pil2</p>
<p>3</p>	<p style="text-align: center;">DX pil3</p>

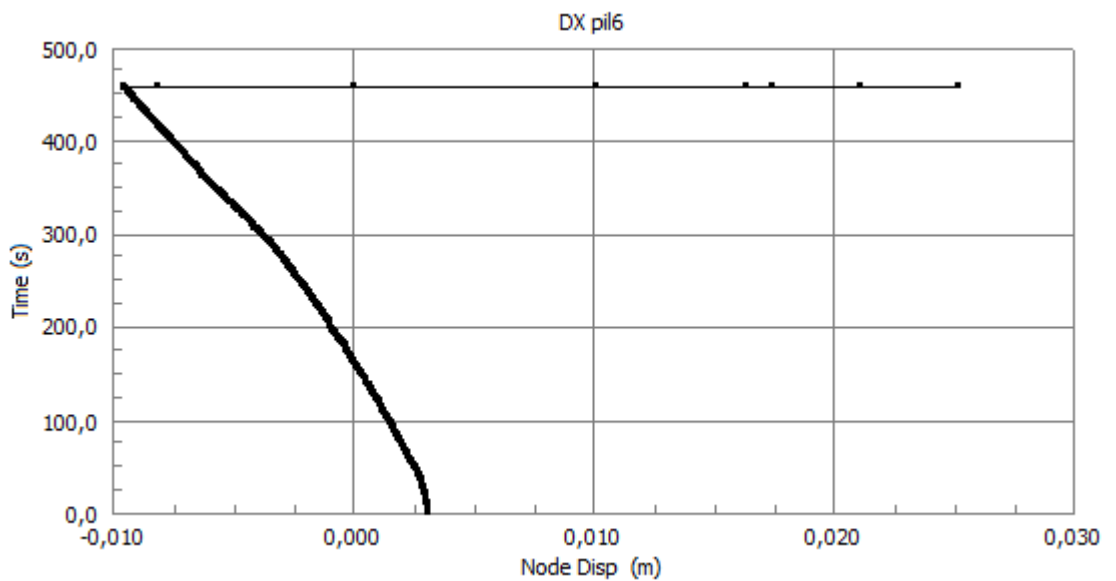
4



5



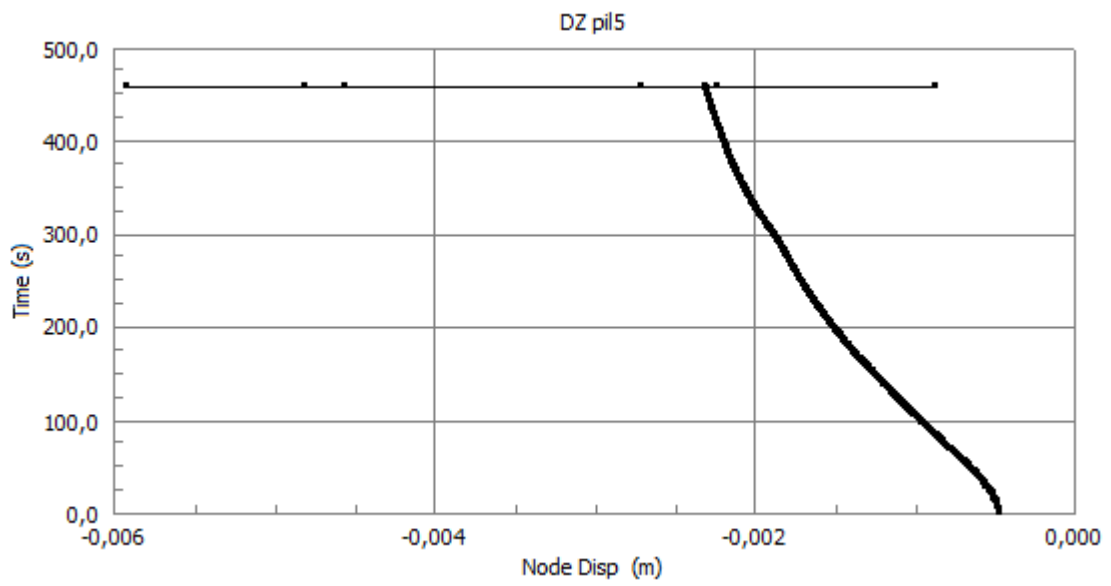
6



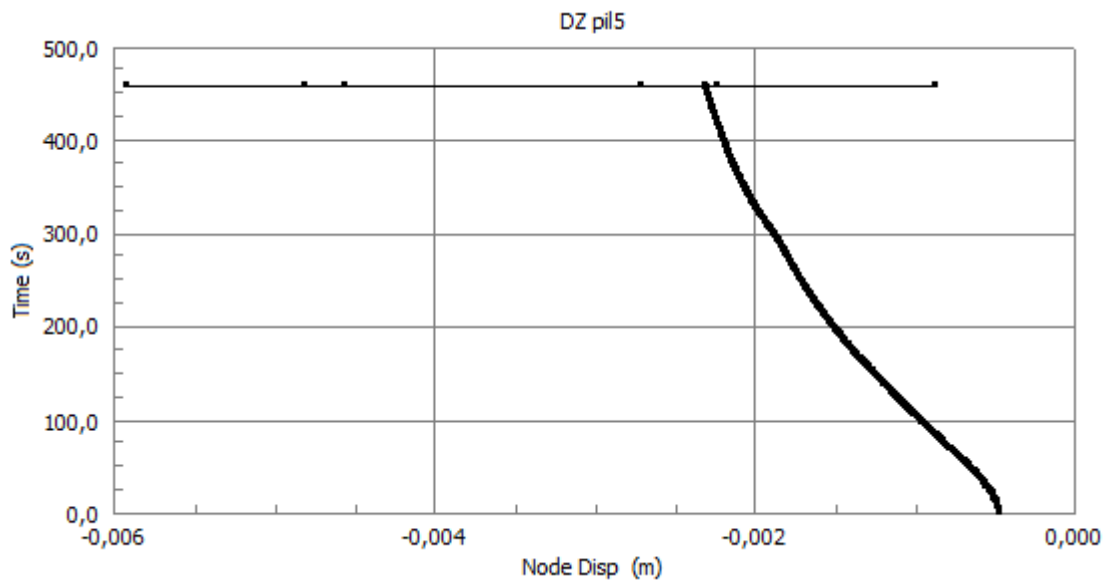
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p> <p style="text-align: center;">Time (s)</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>

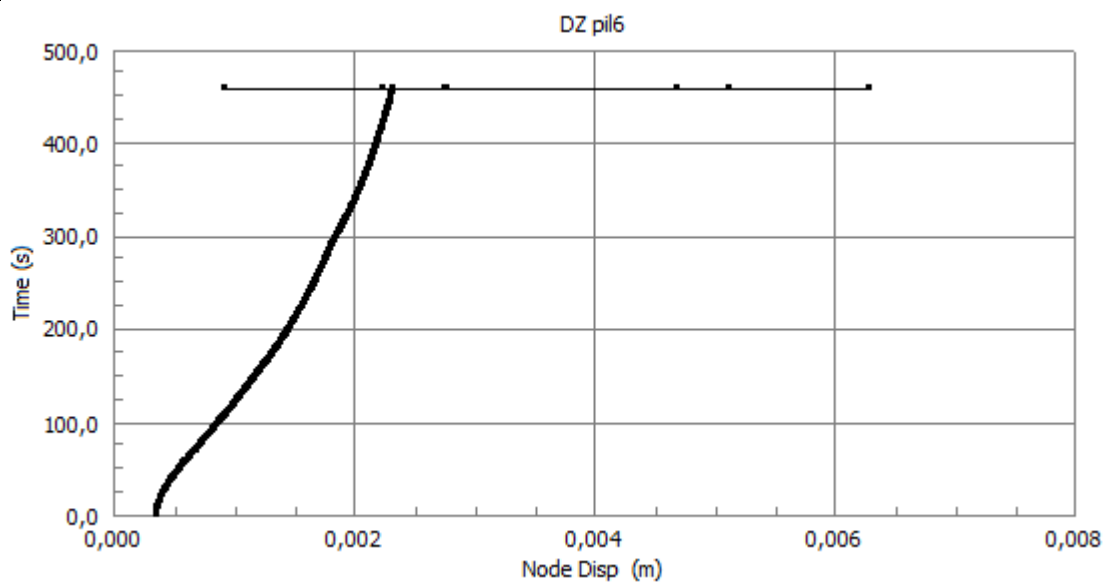
10



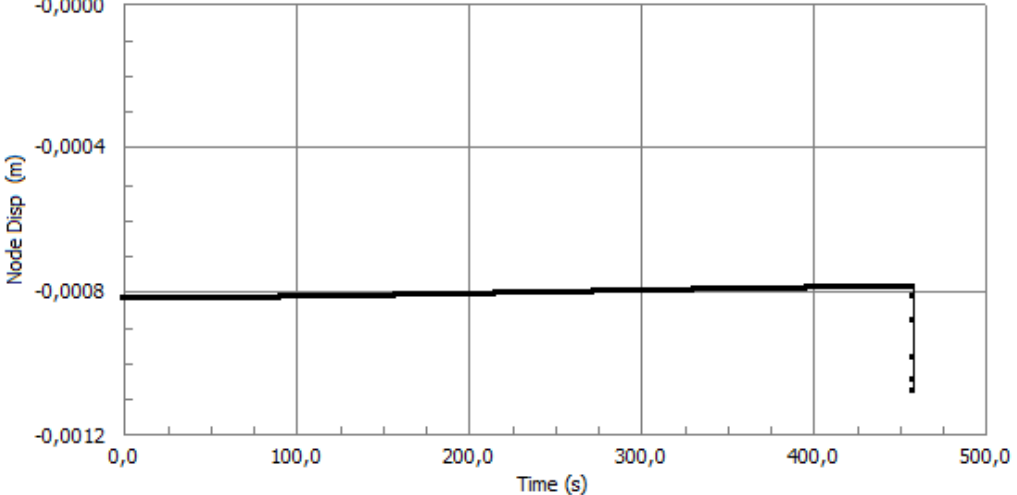
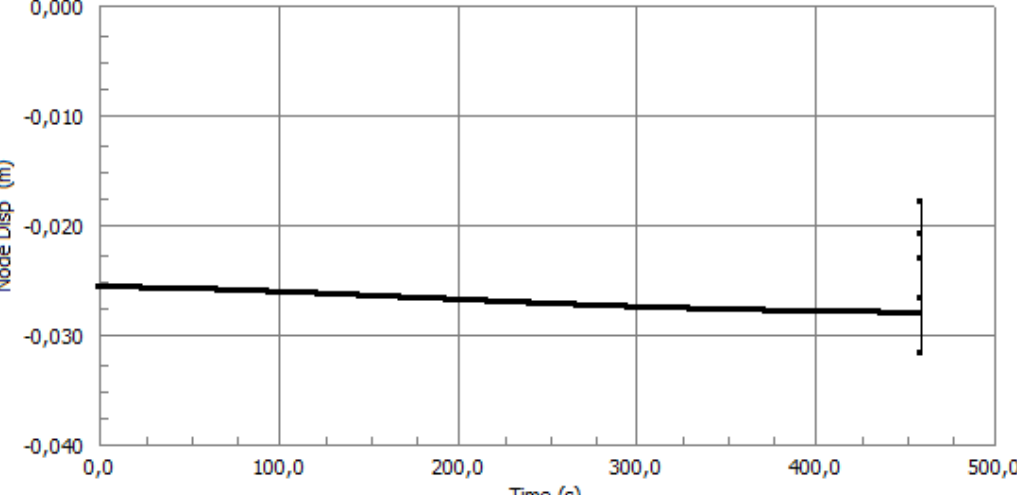
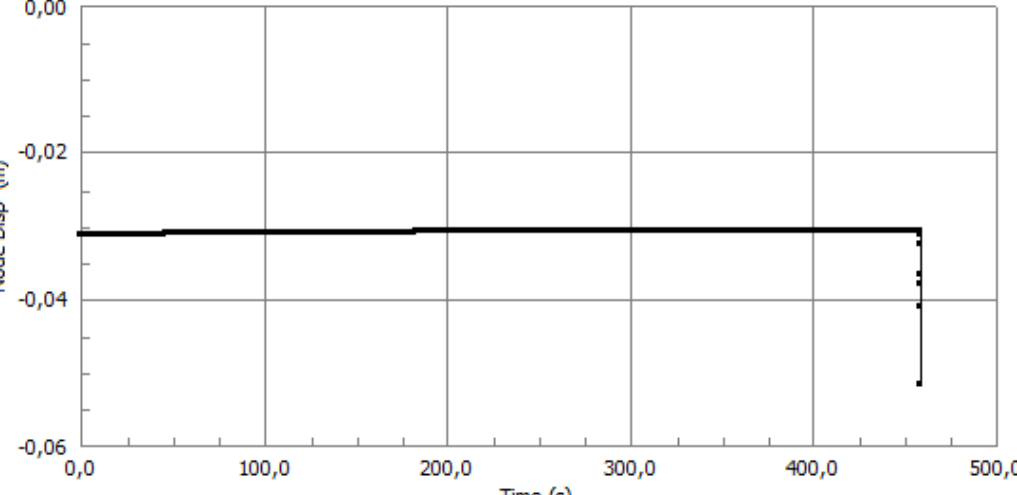
11



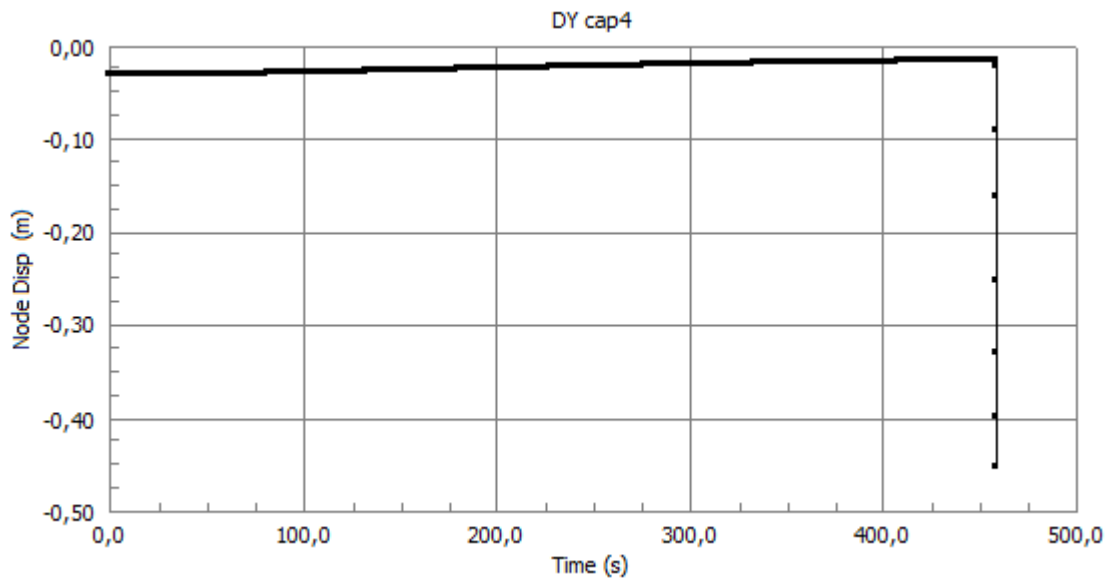
12



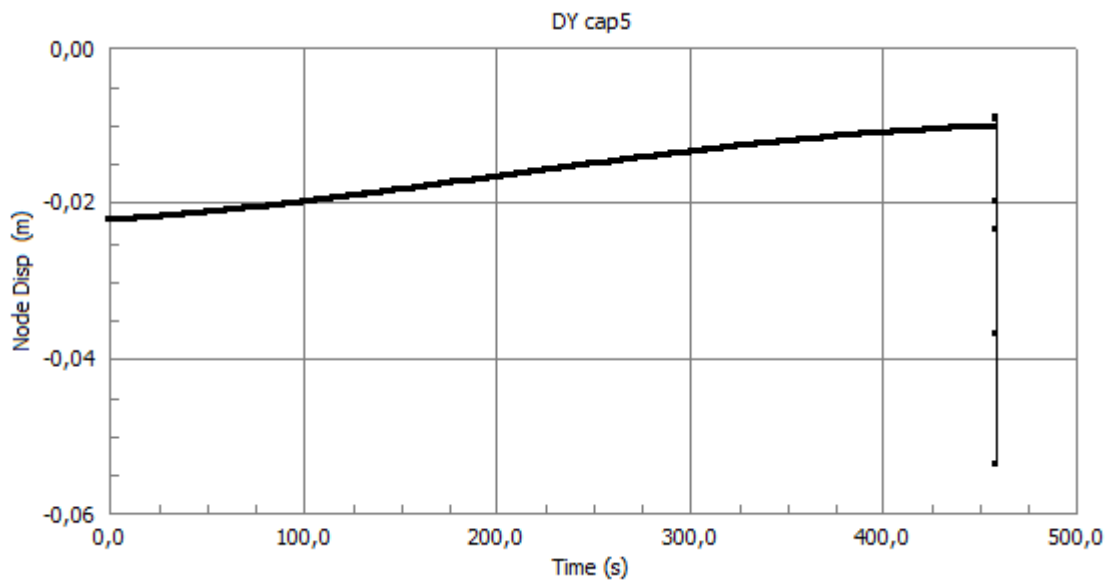
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

Nodo	Grafico
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <p>Node Disp (m)</p> <p>Time (s)</p>

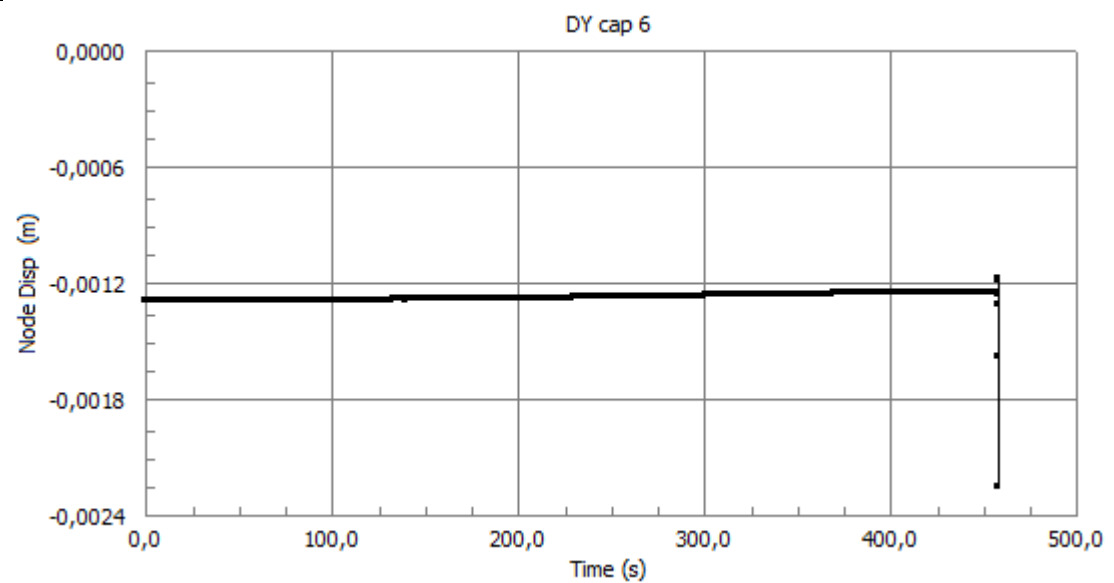
16



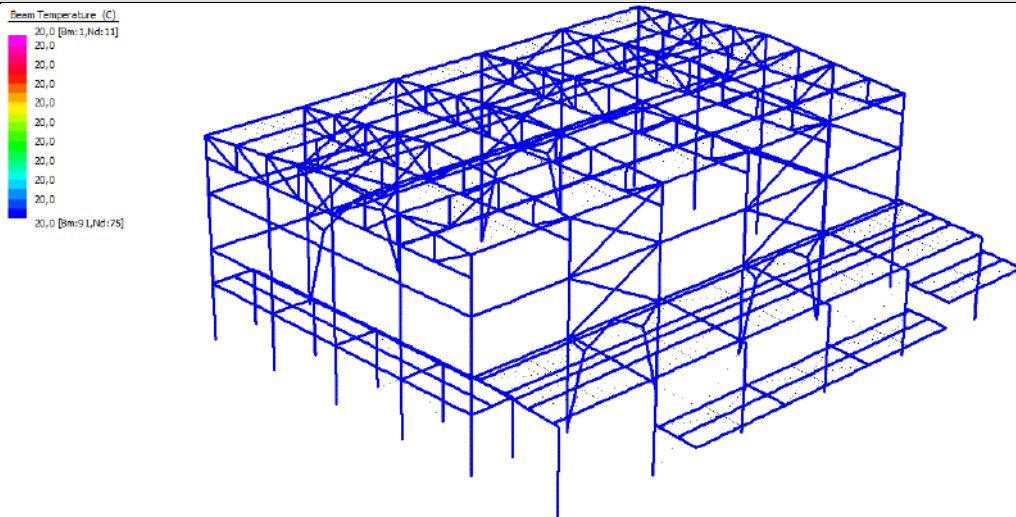
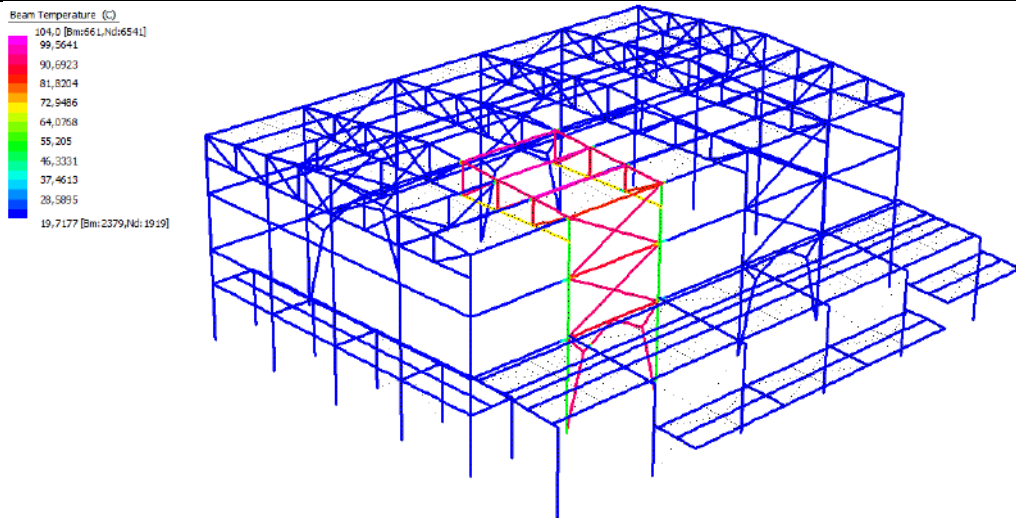
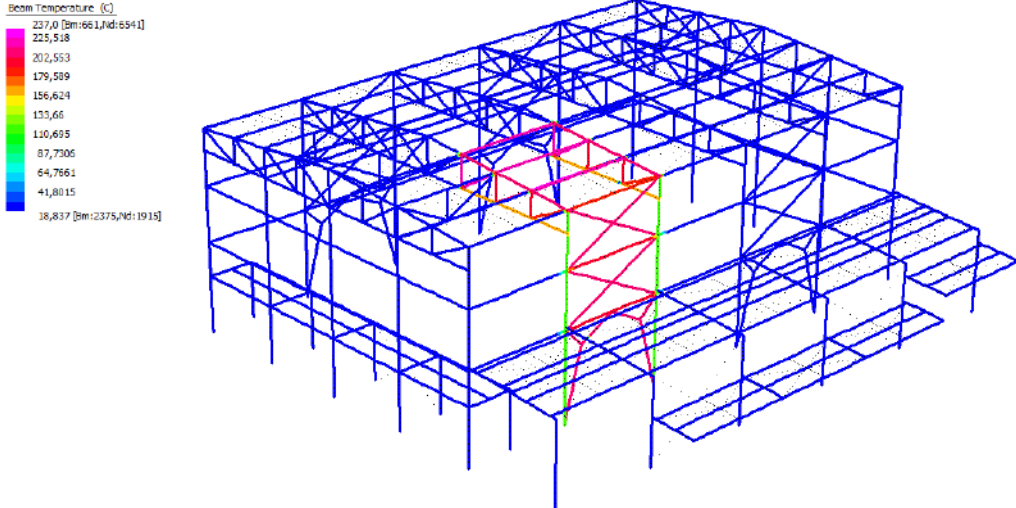
17



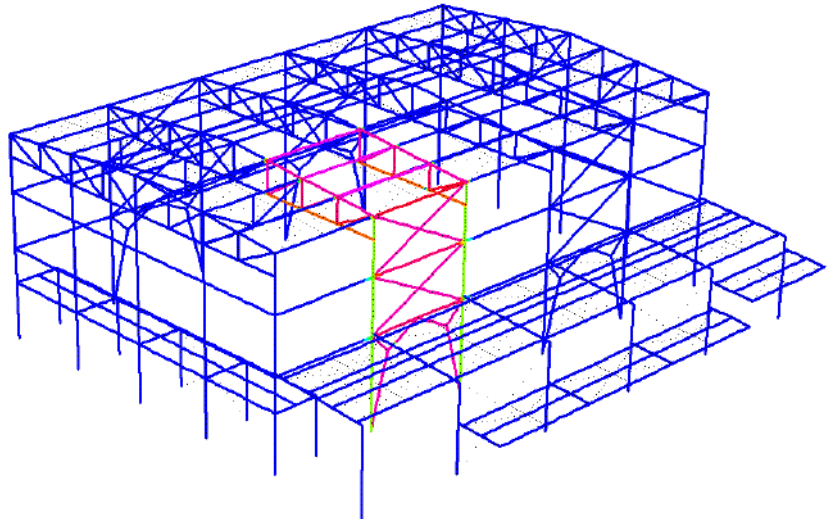
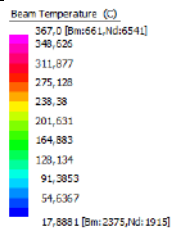
18



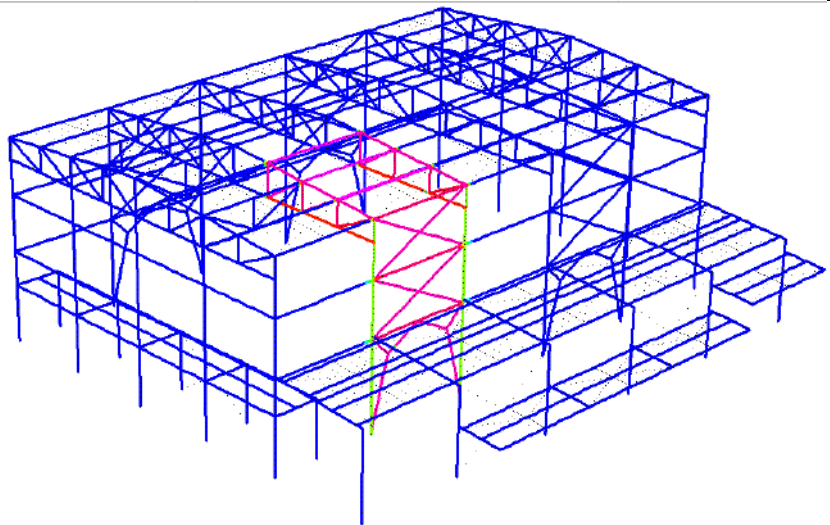
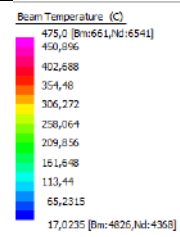
SCENARIO 2.2– STRUTTURA IMPERFETTA

Analisi termica	
Tempo s	Soluzione
1	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>20,0 [Bm:1,Id:11]</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0</p> <p>20,0 [Bm:9,Id:175]</p>
100	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>104,0 [Bm:661,Id:6541]</p> <p>99,5641</p> <p>90,6923</p> <p>81,8204</p> <p>72,9486</p> <p>64,0768</p> <p>55,205</p> <p>46,3331</p> <p>37,4613</p> <p>28,5895</p> <p>19,7177 [Bm:2379,Id:1919]</p>
200	 <p>Beam Temperature (C)</p> <p>237,0 [Bm:661,Id:6541]</p> <p>225,518</p> <p>202,553</p> <p>179,589</p> <p>156,624</p> <p>133,66</p> <p>110,695</p> <p>87,7306</p> <p>64,7661</p> <p>41,8015</p> <p>18,837 [Bm:2375,Id:1915]</p>

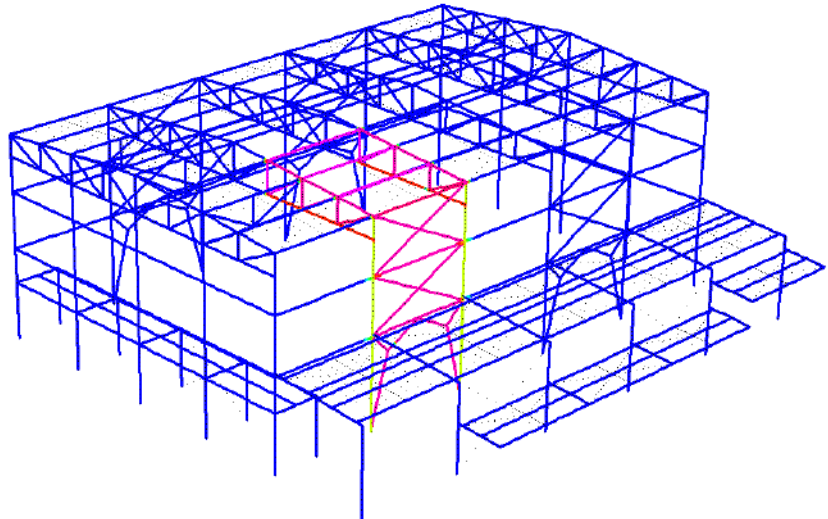
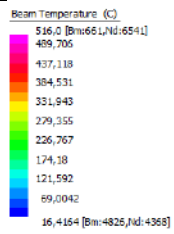
300



400



450

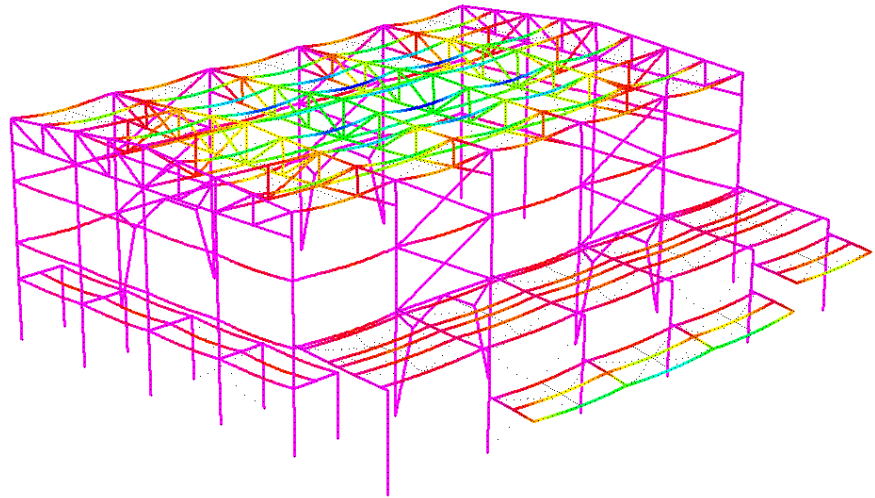
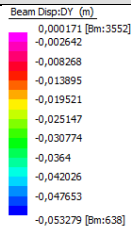


Analisi Meccanica

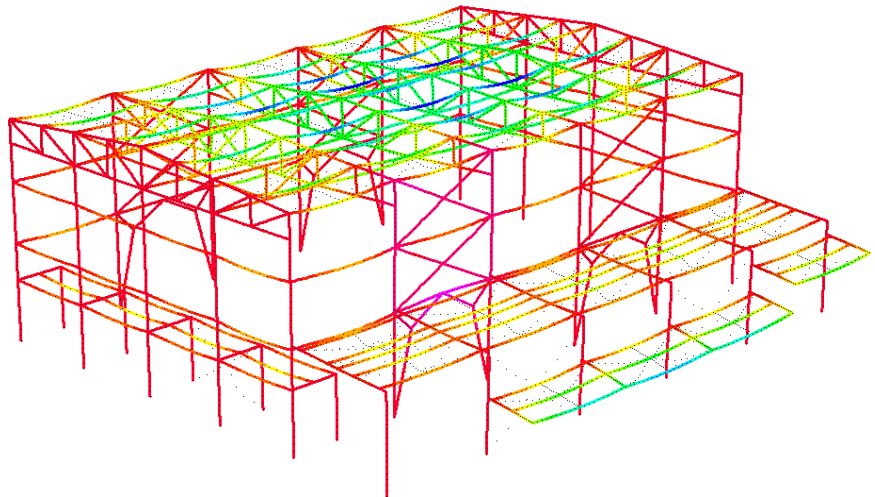
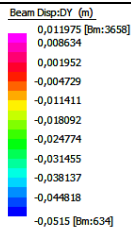
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse verticale Y

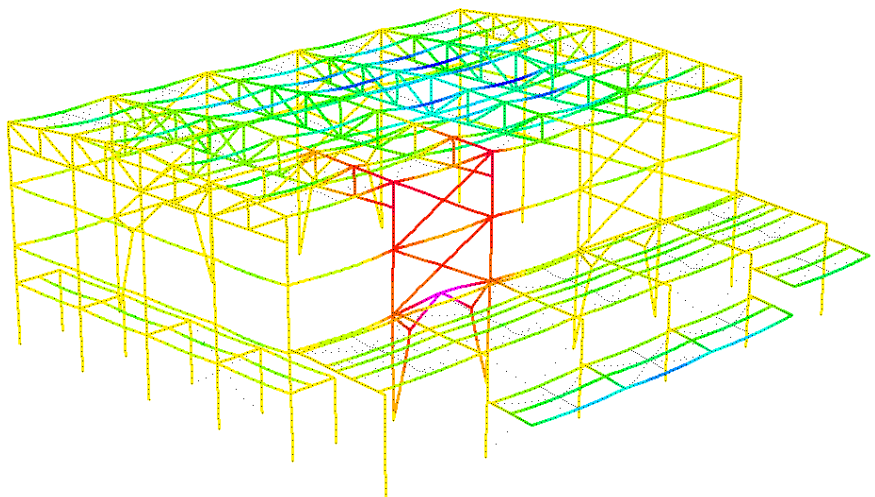
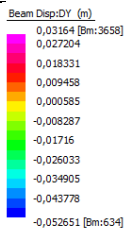
1



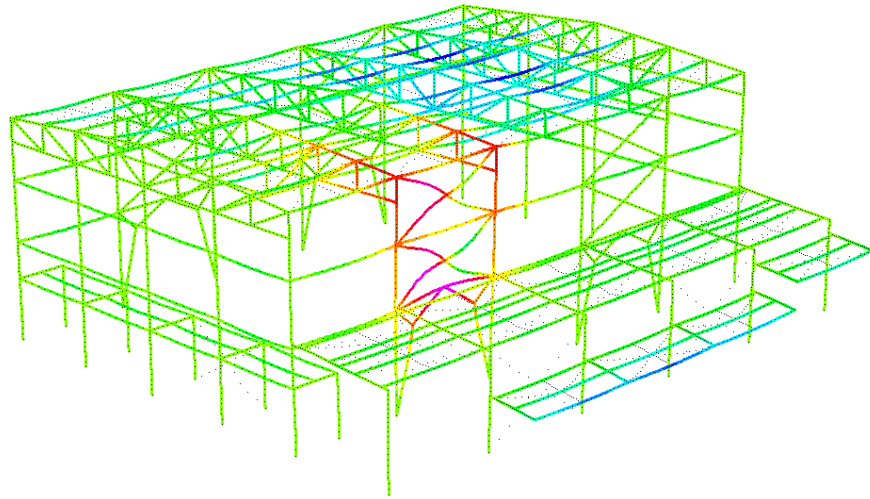
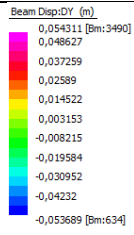
100



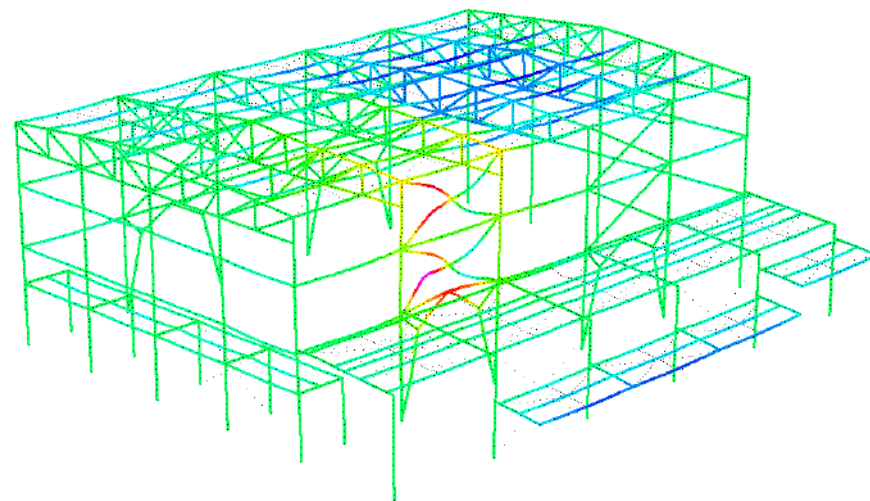
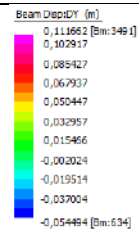
200



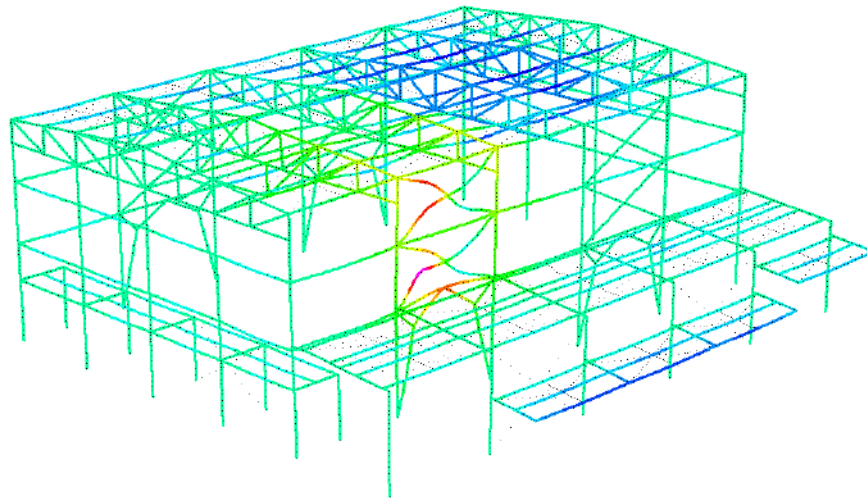
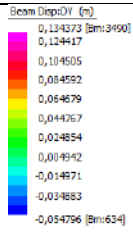
300



400



450

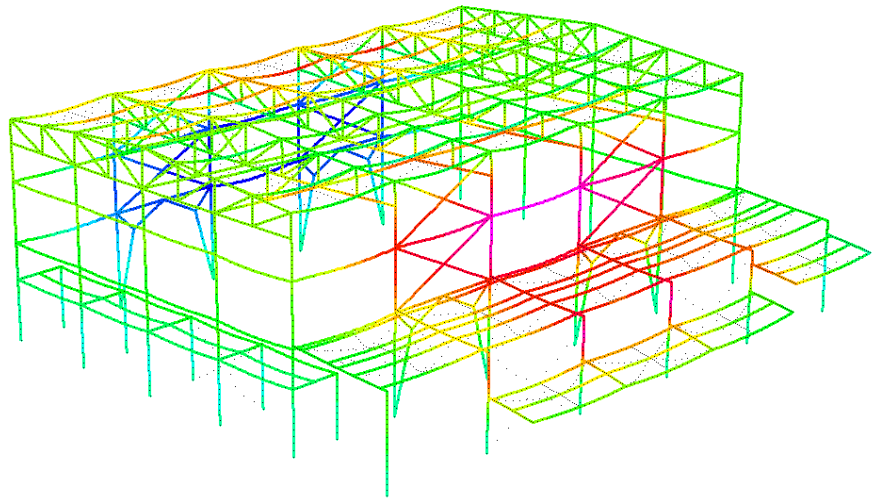
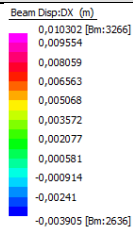


Analisi Meccanica

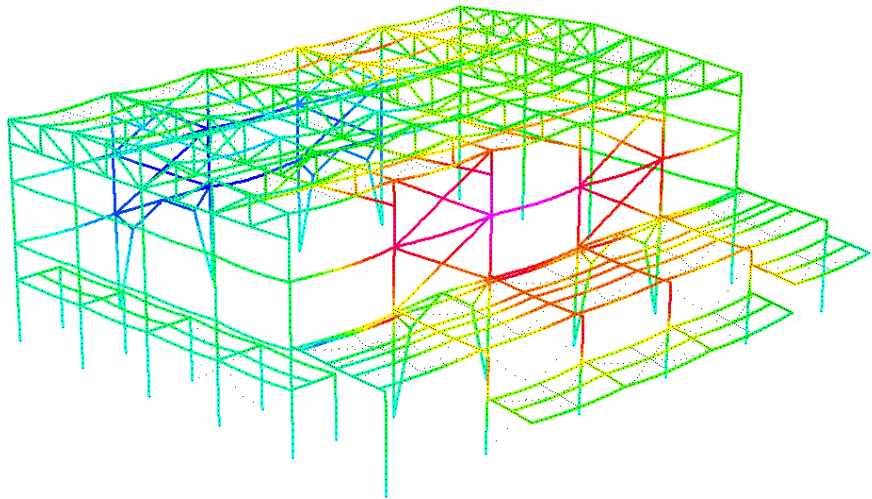
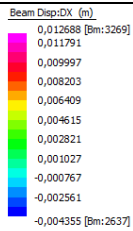
Tempo s

Soluzione spostamenti lungo l'asse orizzontale X

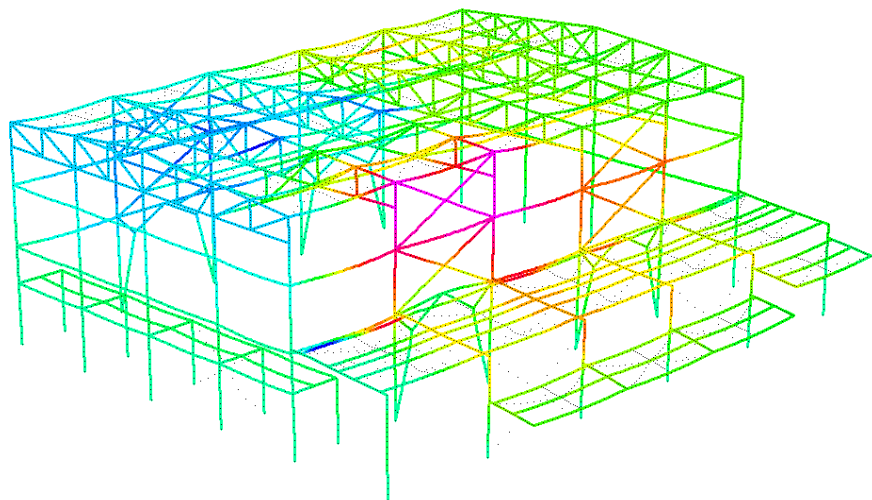
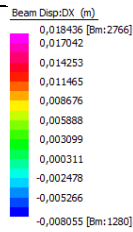
1



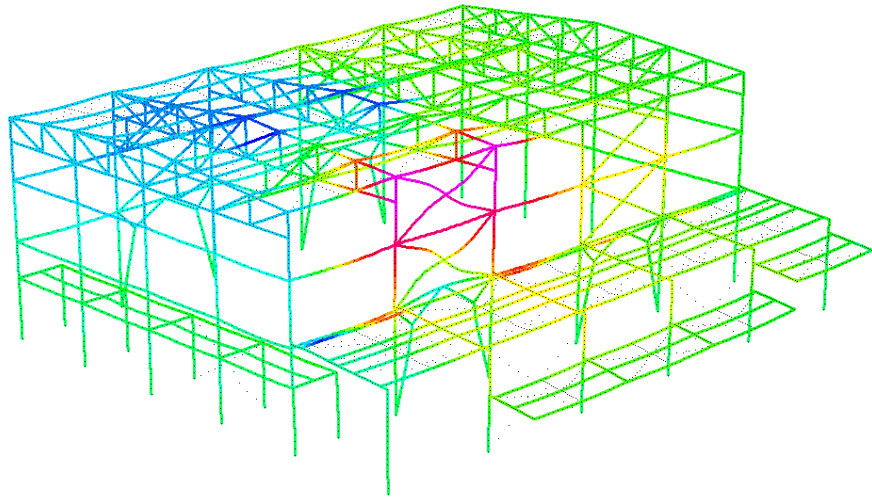
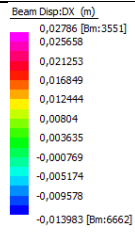
100



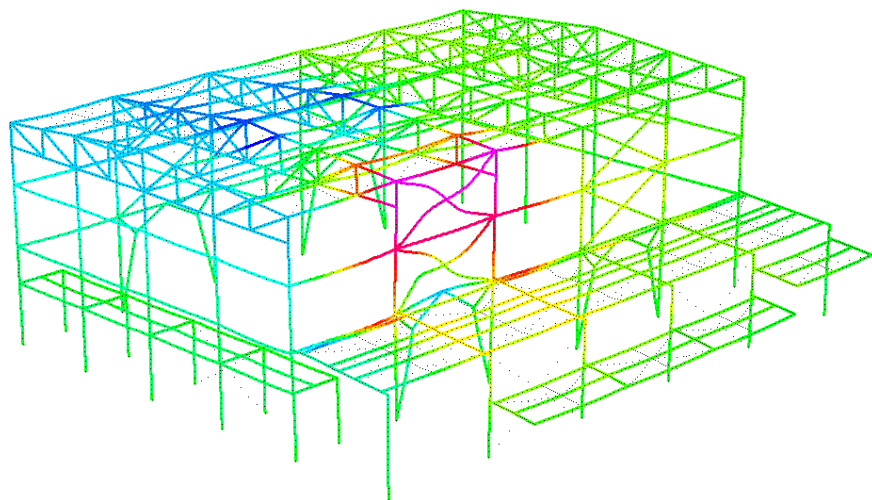
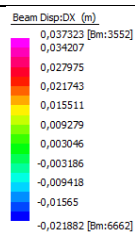
200



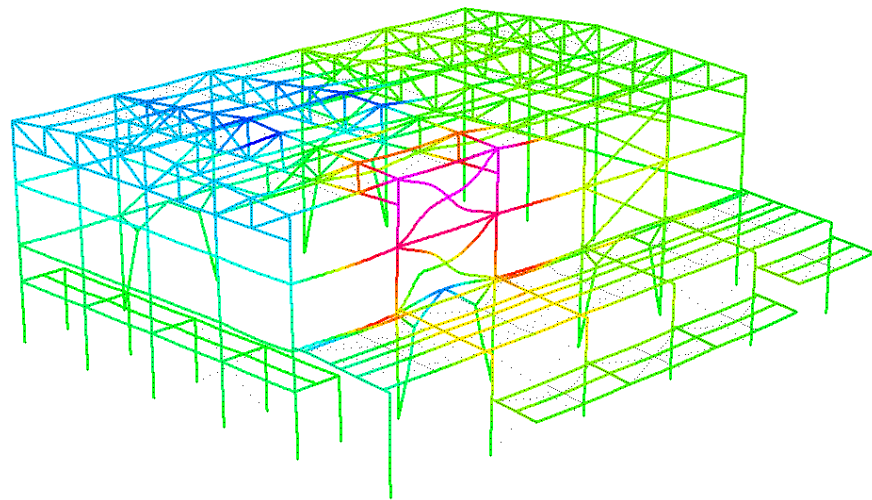
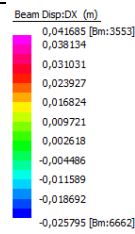
300



400



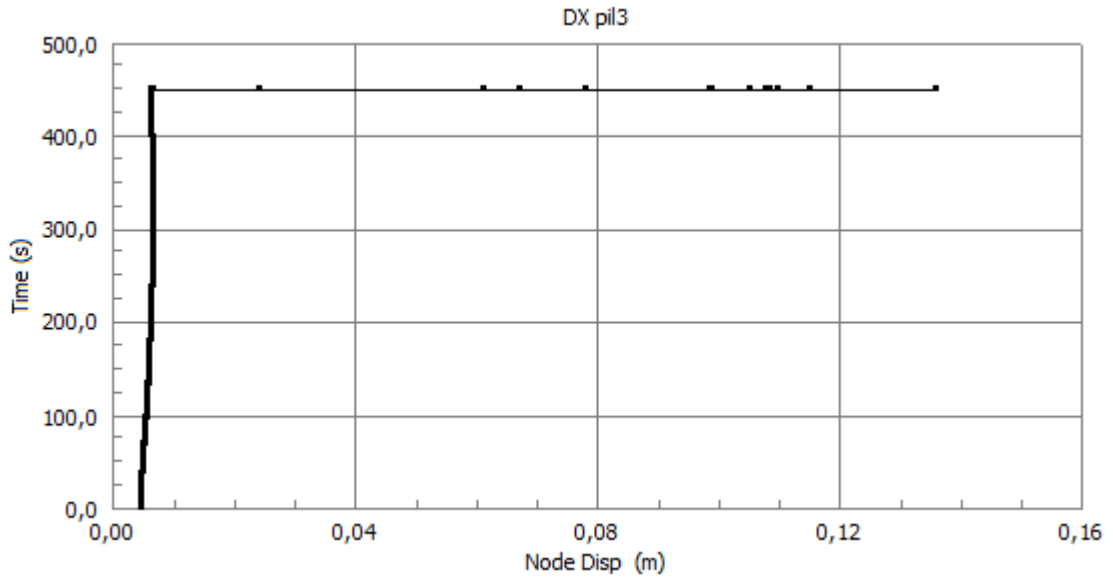
450



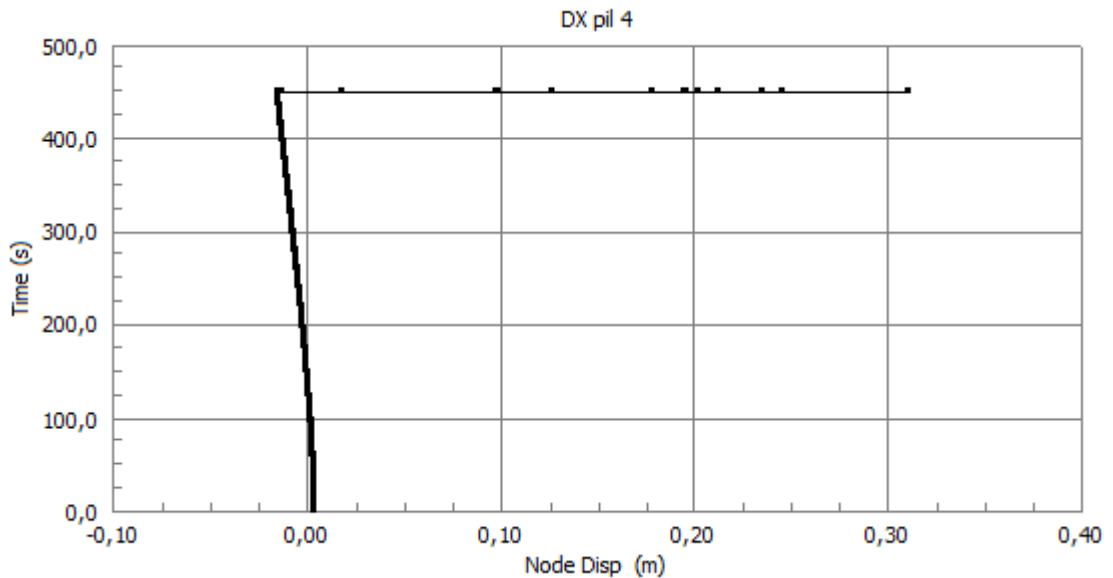
Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse X

Nodo	Grafico
1	<p style="text-align: center;">DX pil1</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>
2	<p style="text-align: center;">DX pil2</p> <p style="text-align: center;">Node Disp (m)</p>

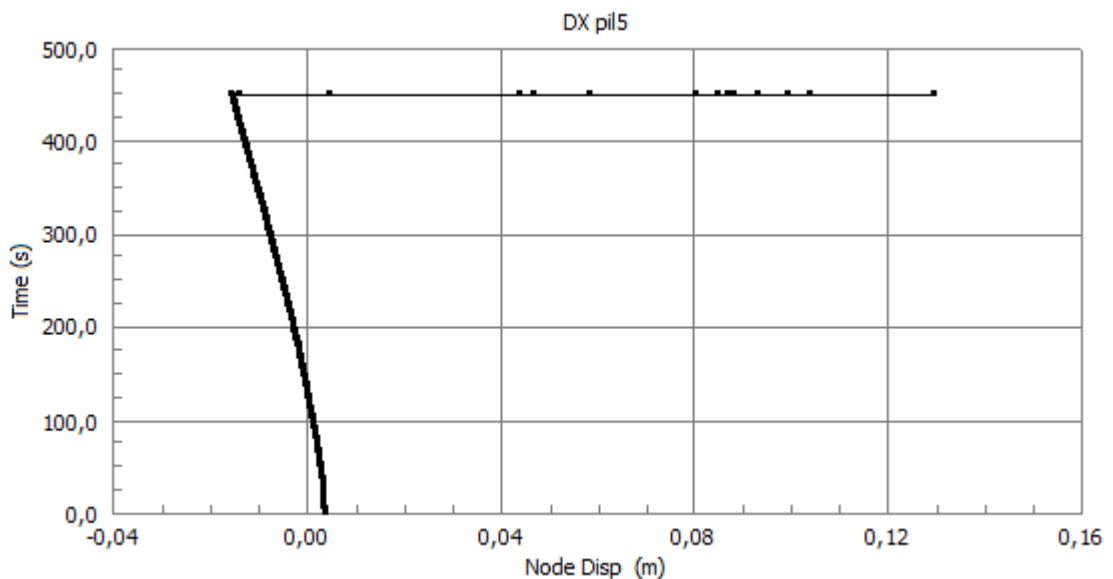
3



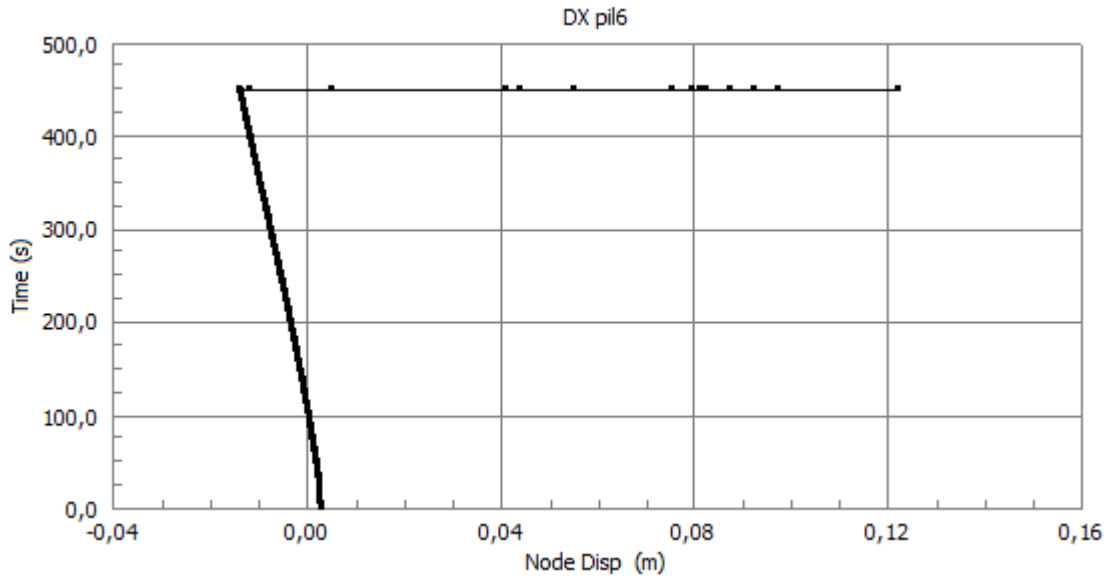
4



5



6

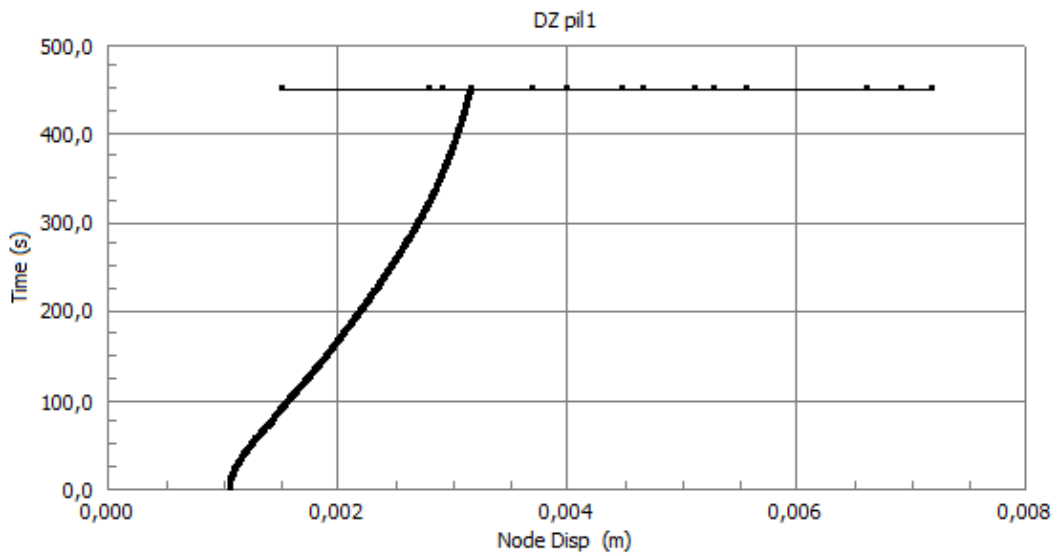


Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti orizzontali lungo l'asse Z

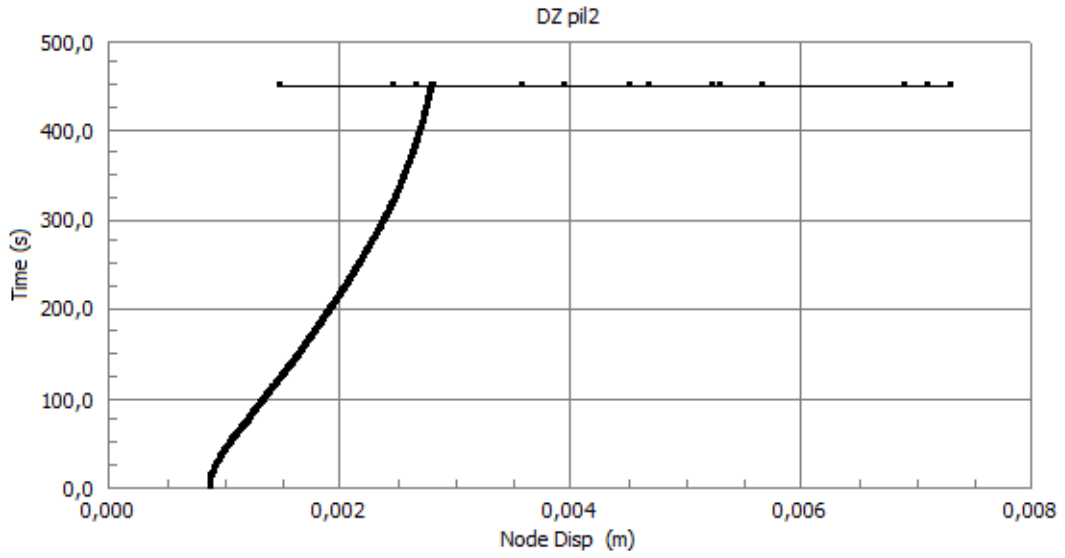
No do

Grafico

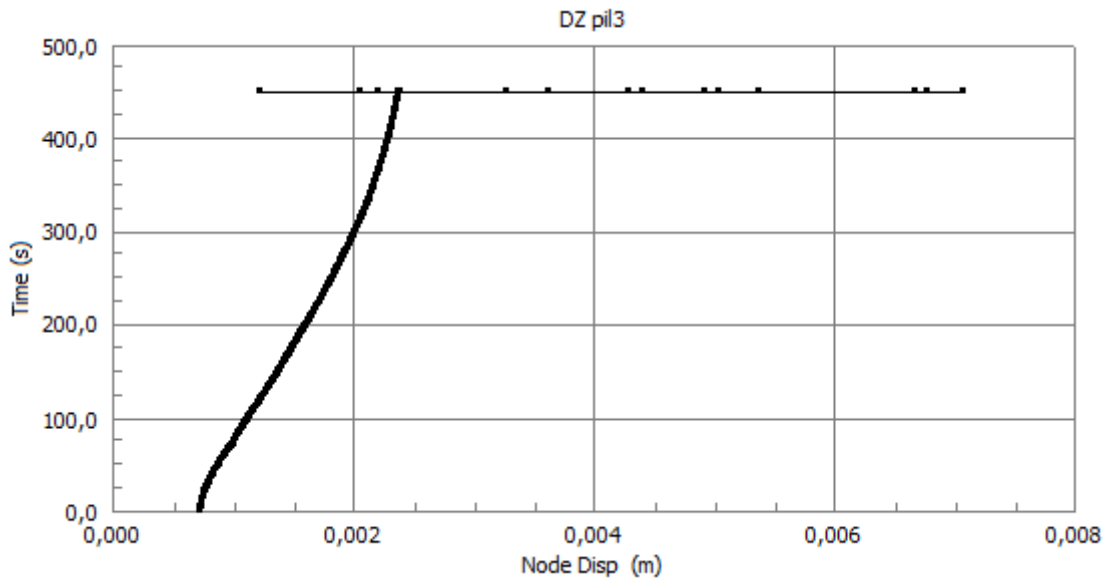
7



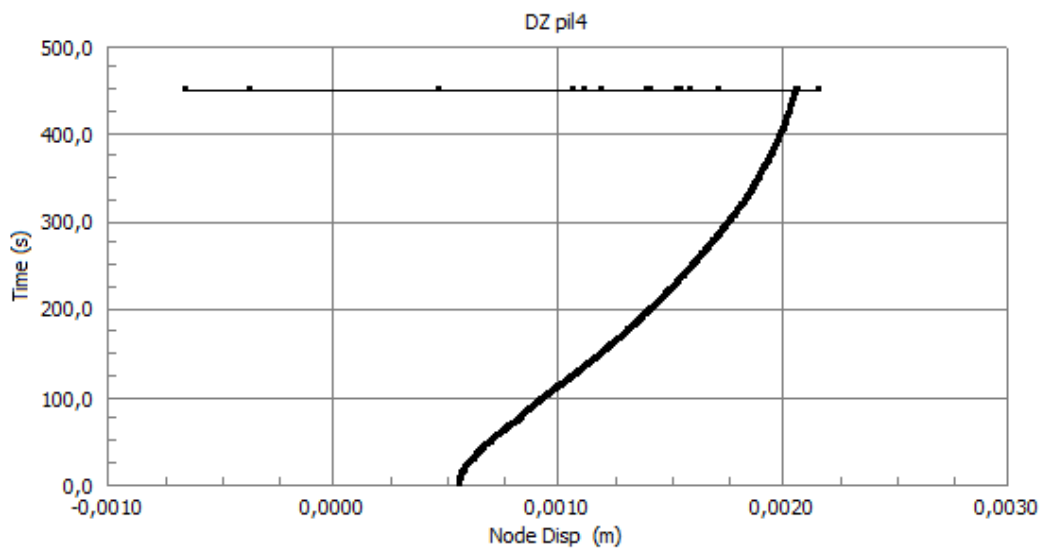
8



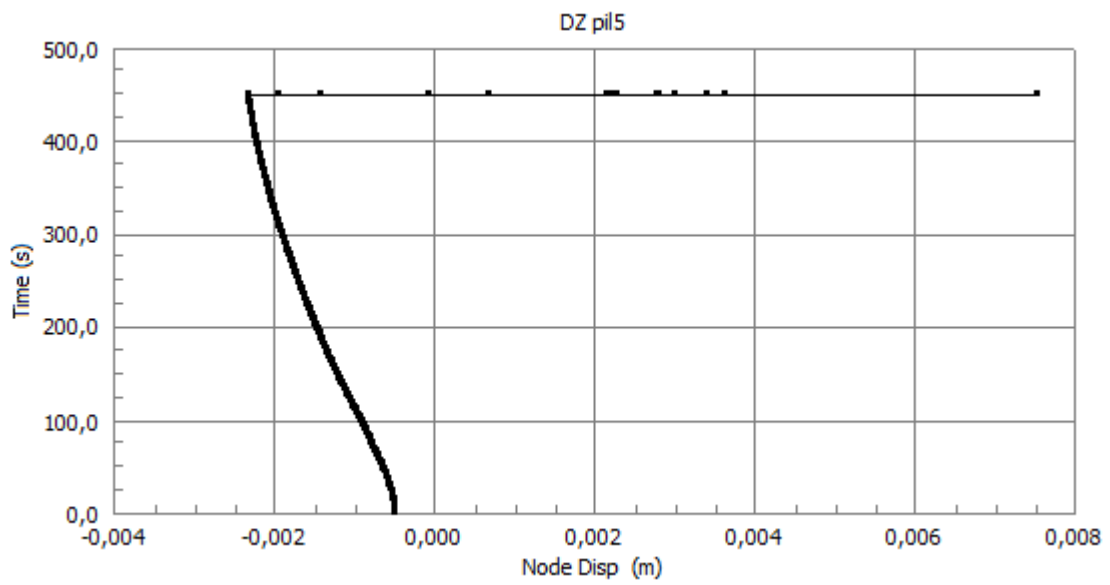
9



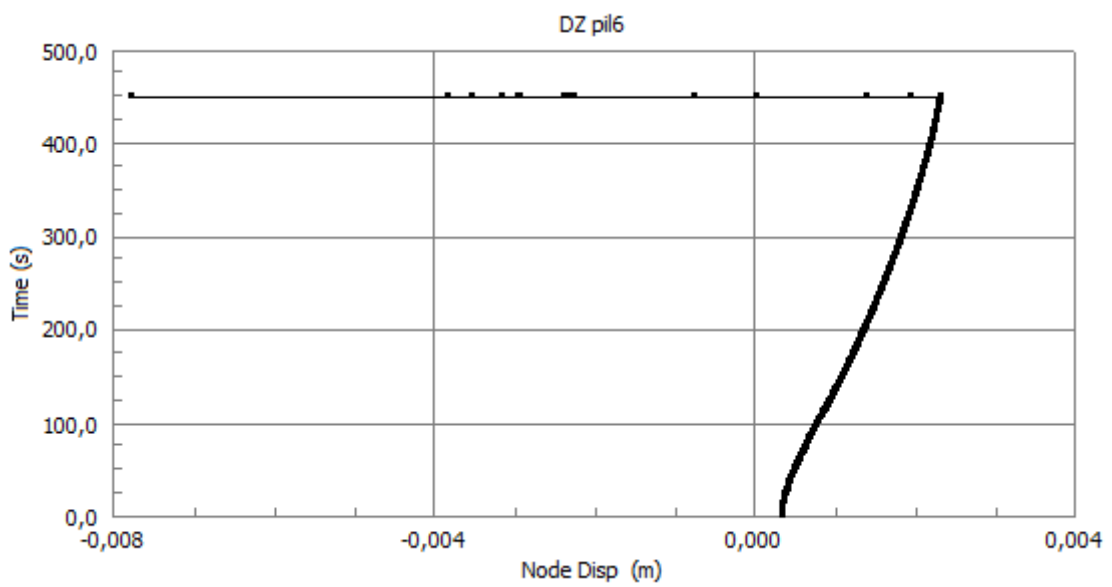
10



11



12

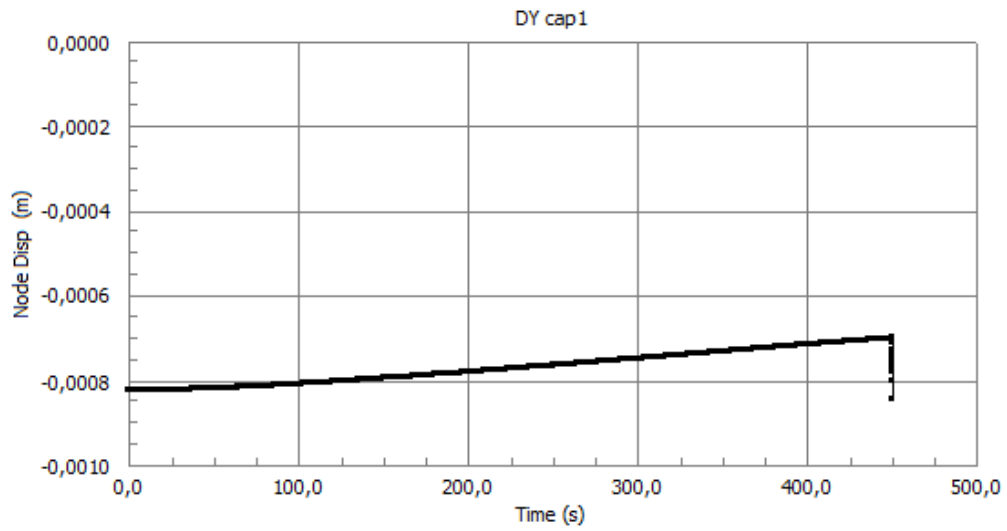


Punti di controllo incendio generalizzato spostamenti verticali lungo l'asse Y

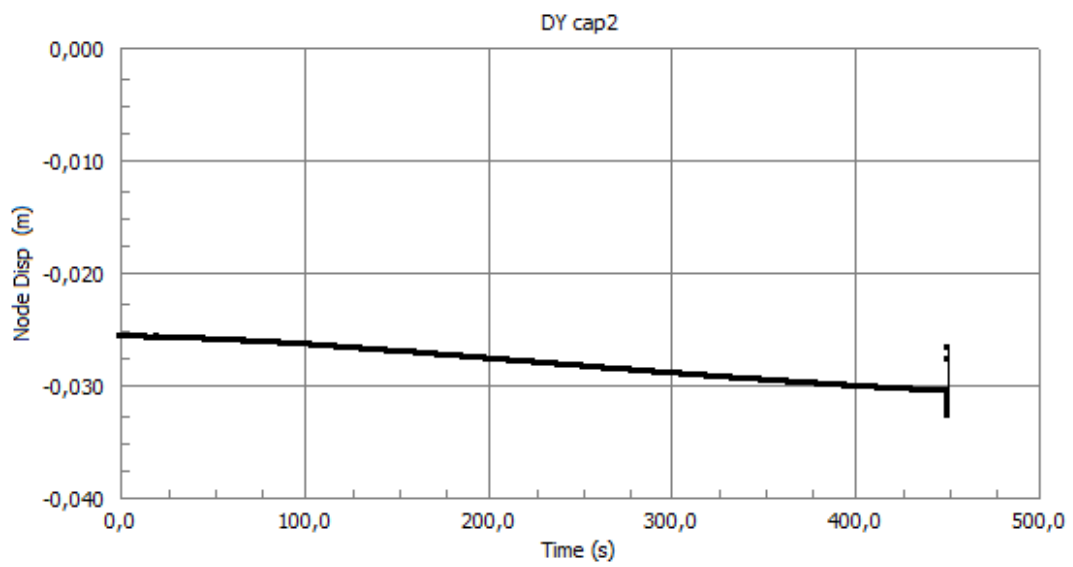
Nod
o

Grafico

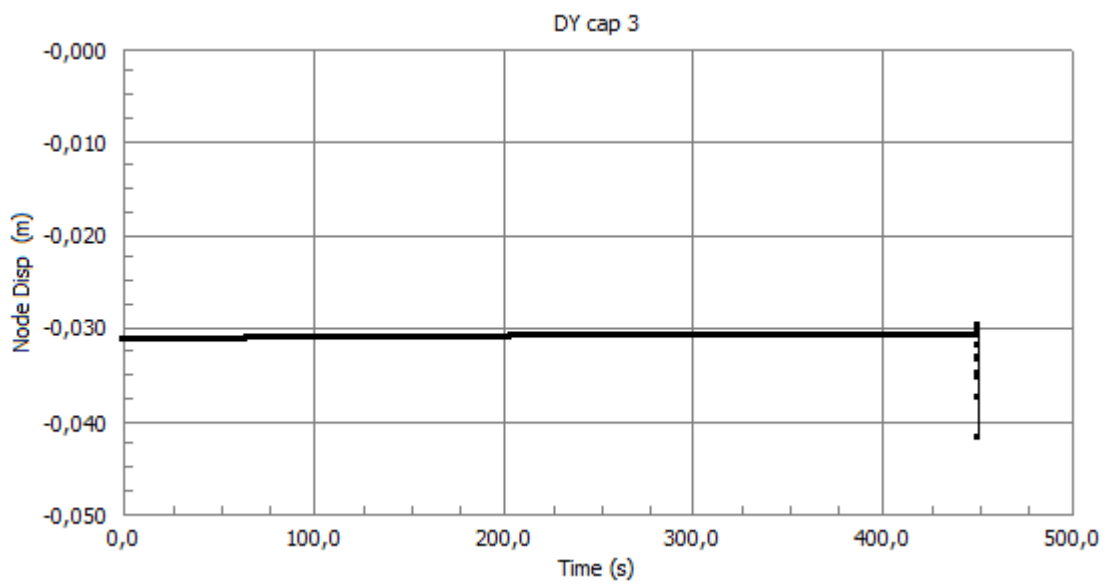
13



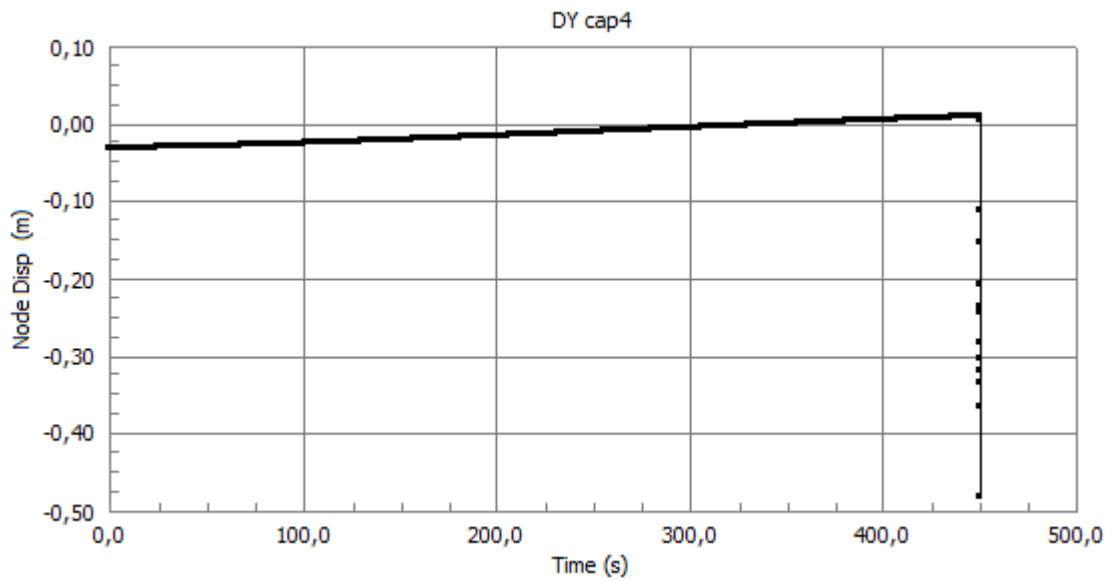
14



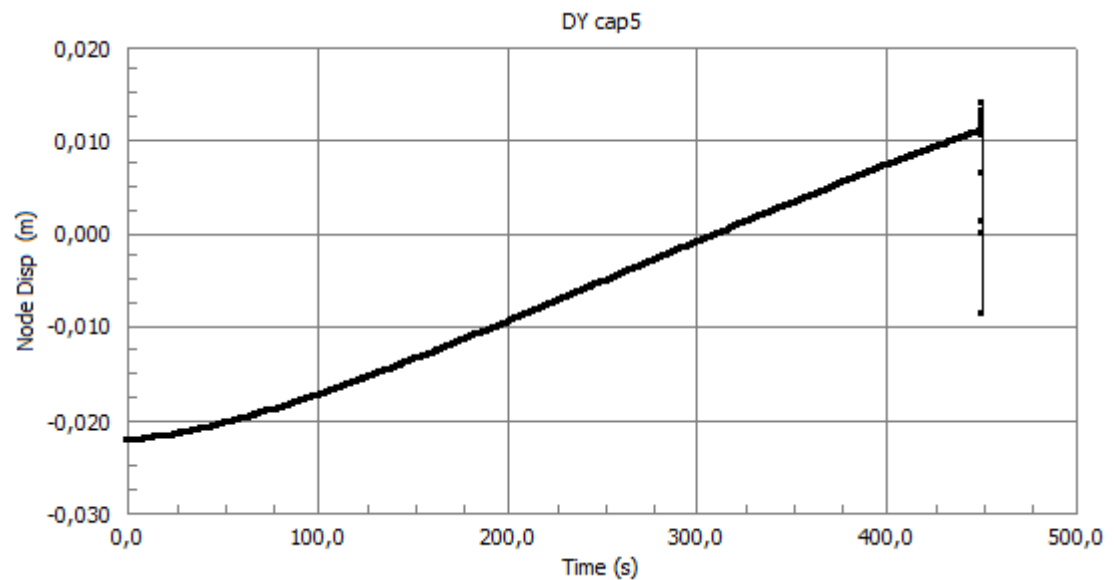
15



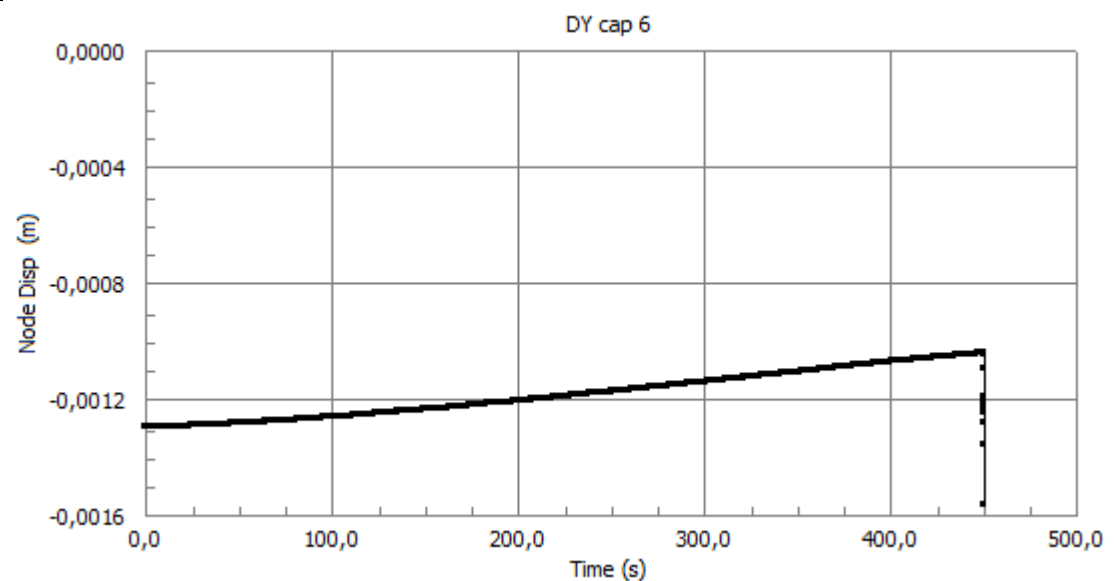
16



17

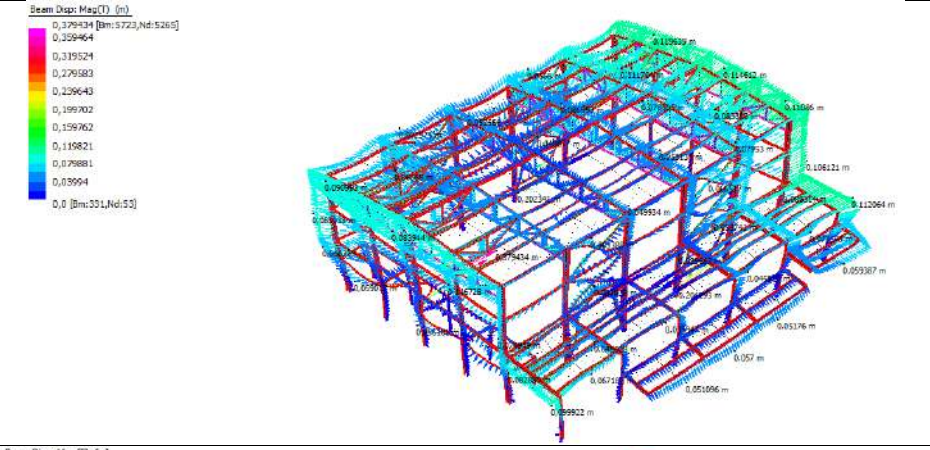
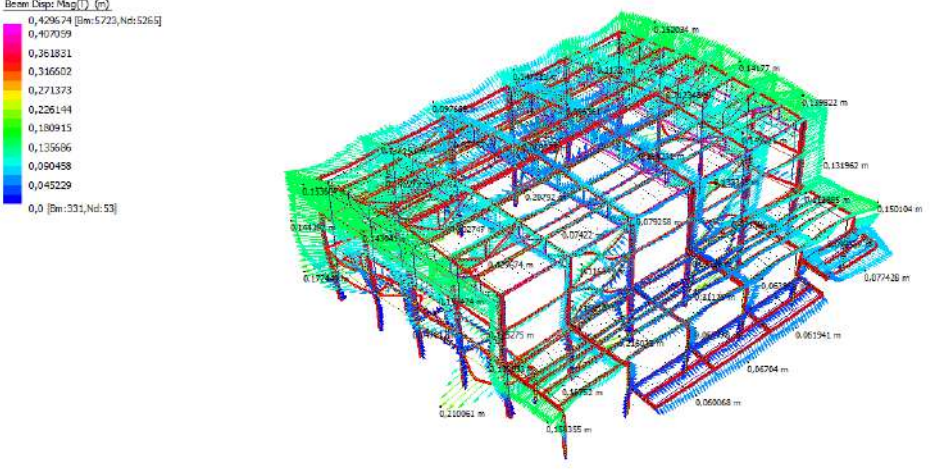
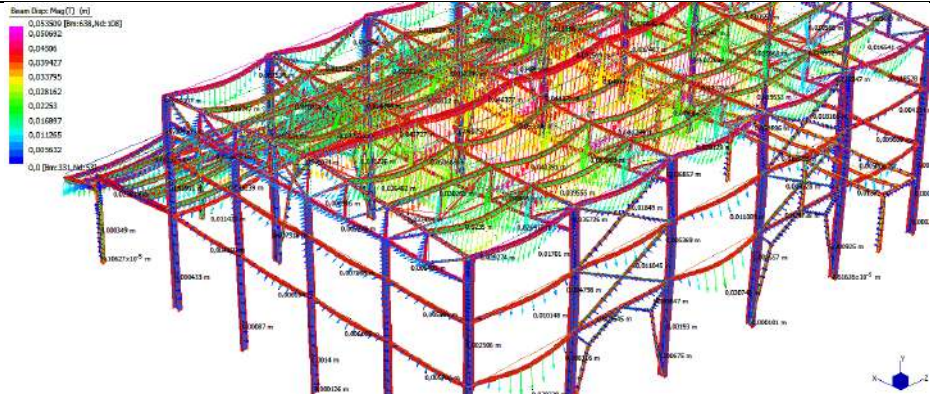
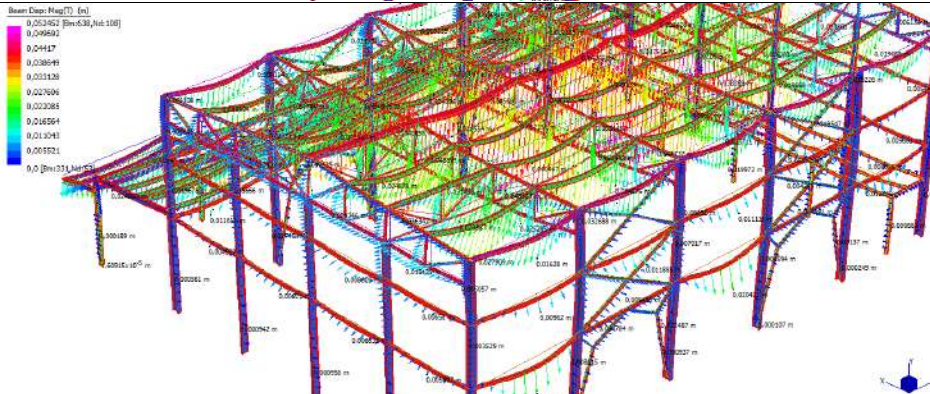


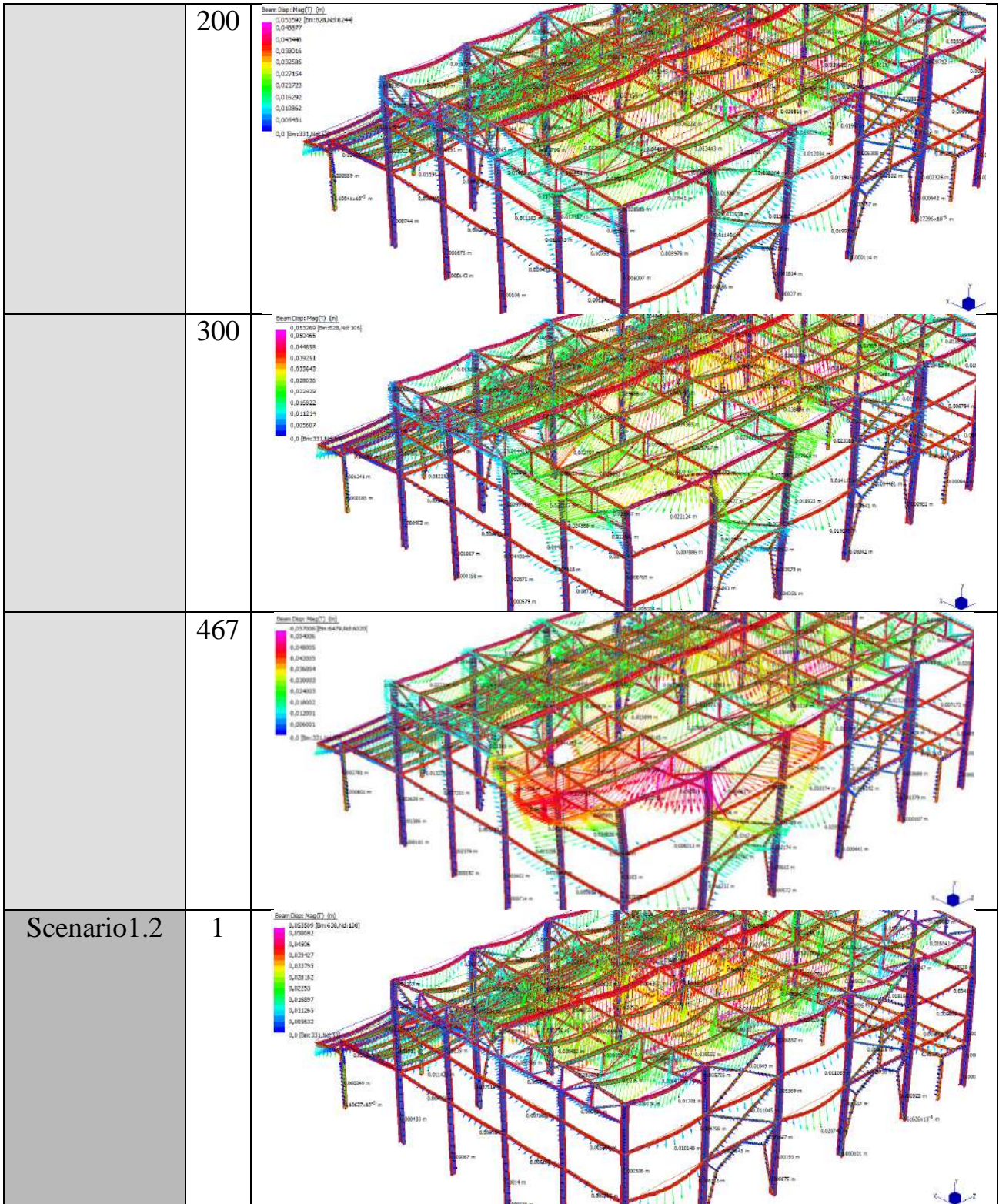
18

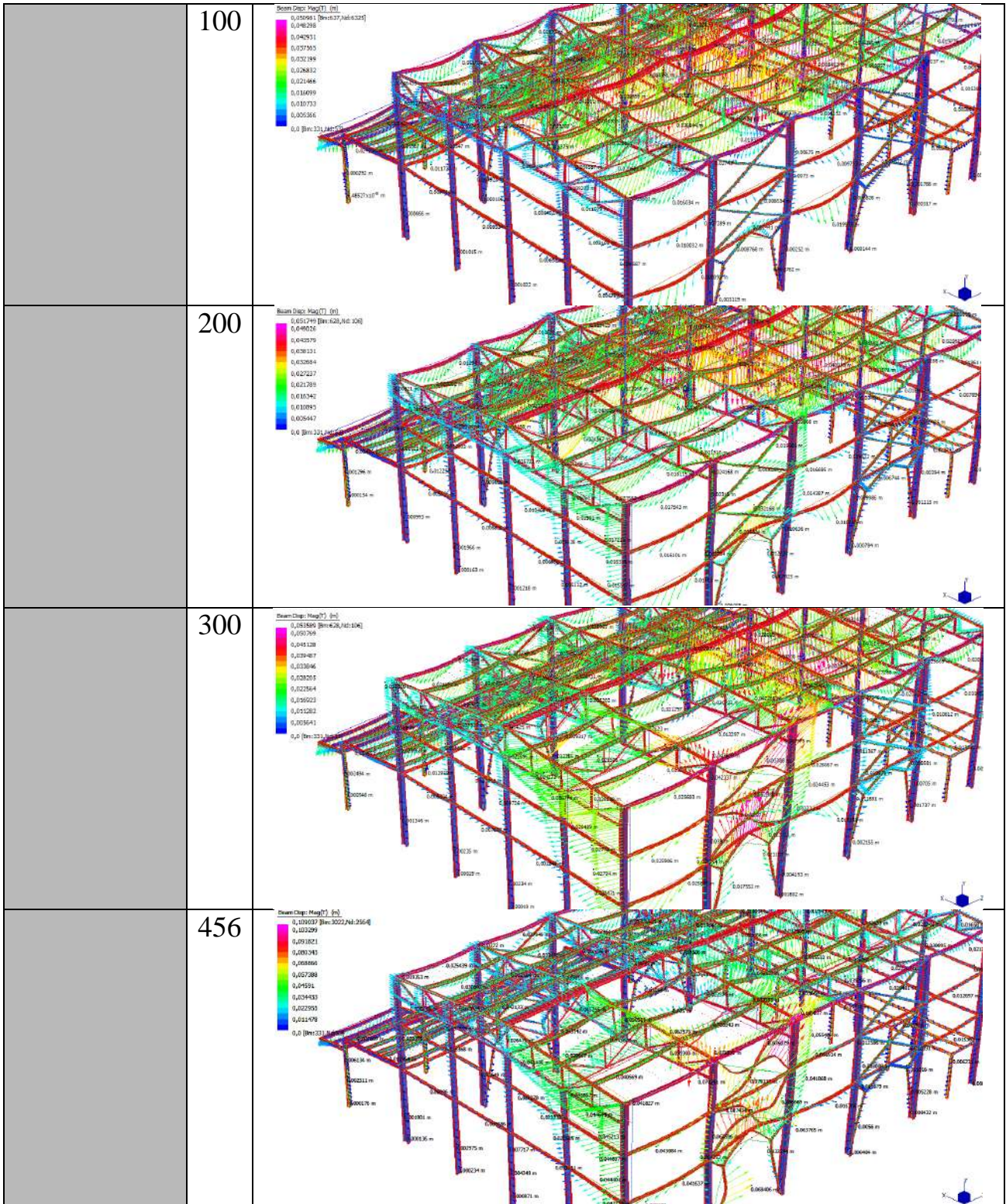


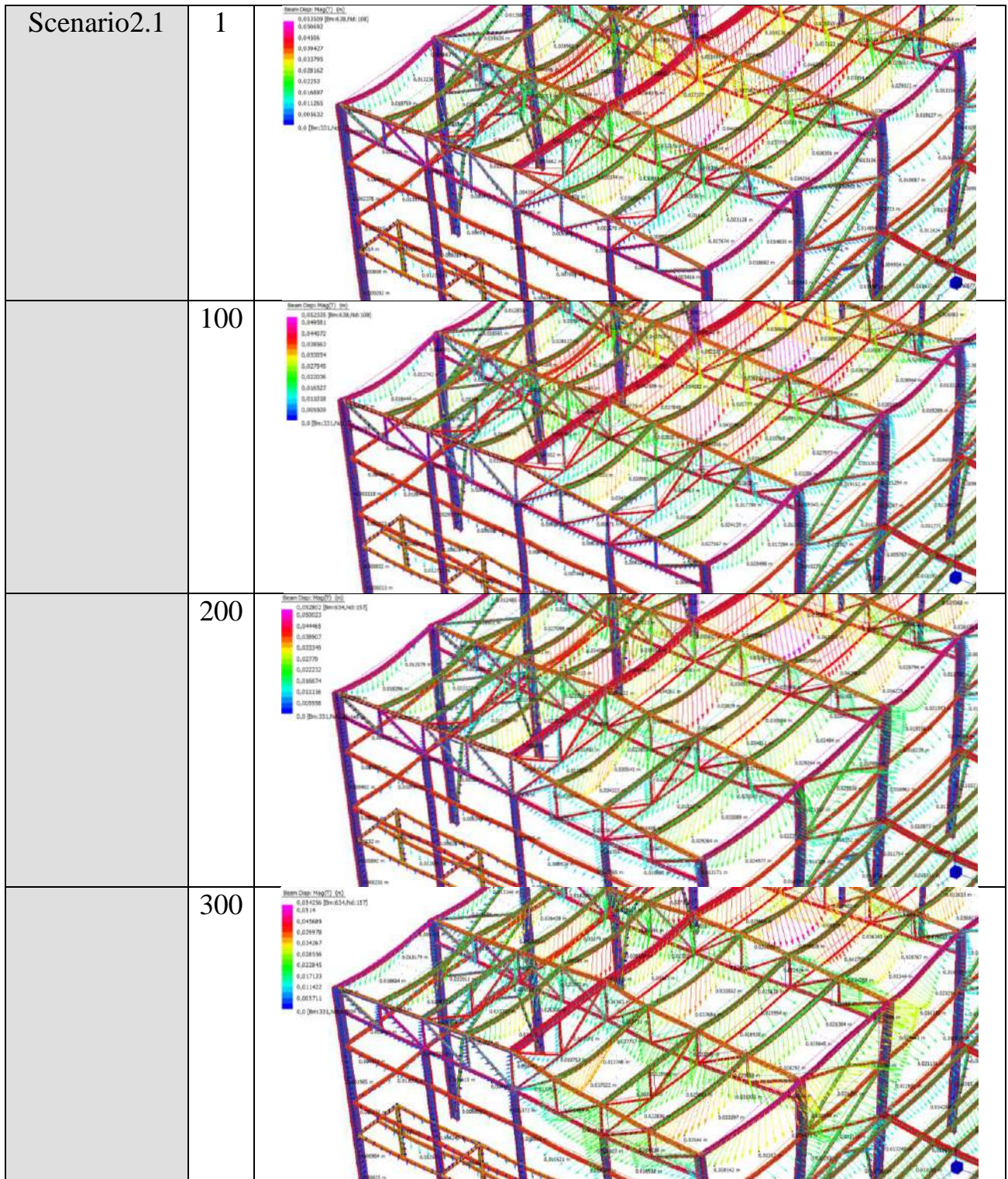
Di seguito si riportano i dettagli, per i 5 casi, delle zone in cui avviene il collasso rispetto alla condizione indeformata.

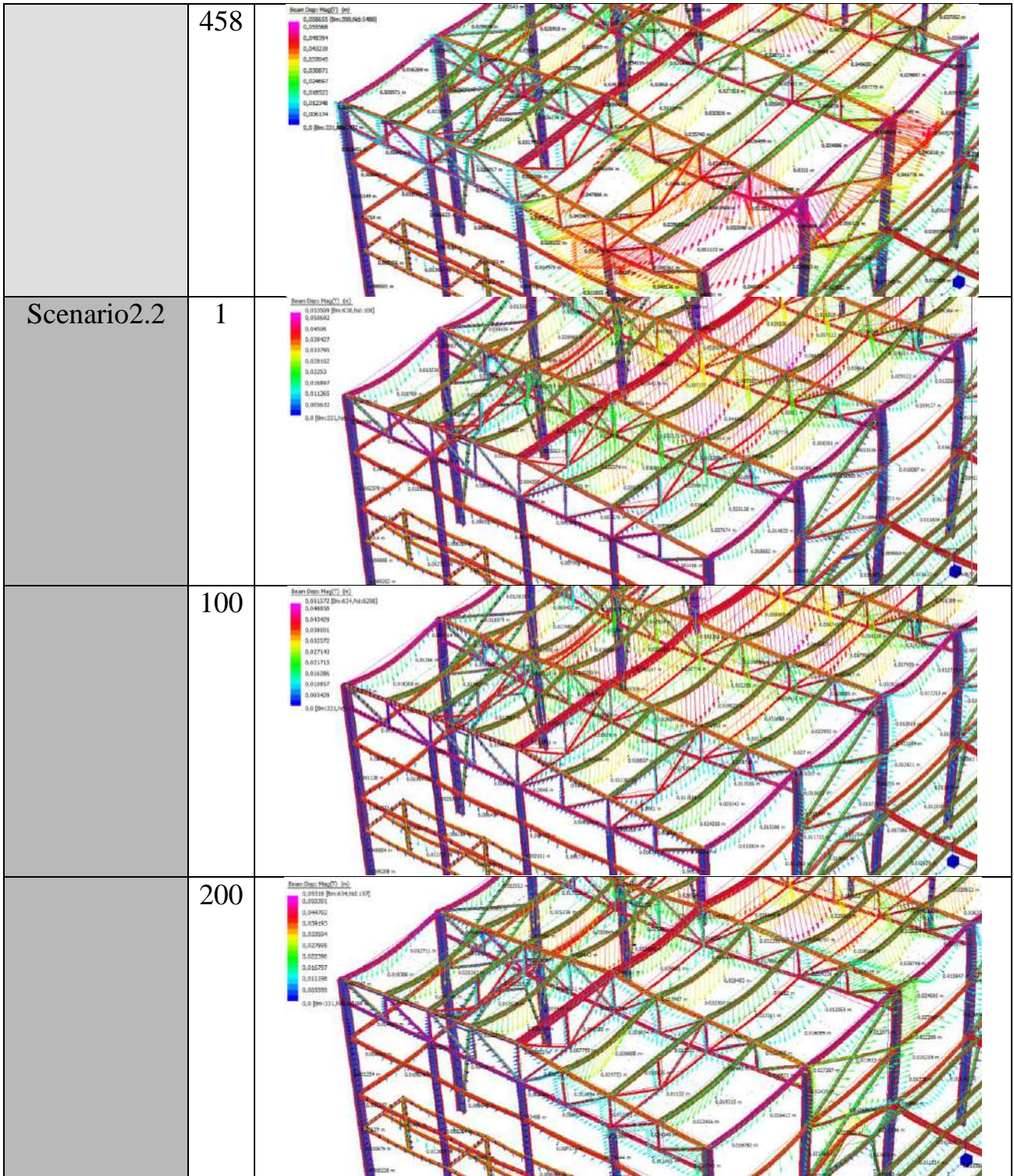
PARTICOLARI COSTRUTTIVI AL TEMPO t_{fail}		
	t [s]	
Generalizzato	1	
	100	
	200	

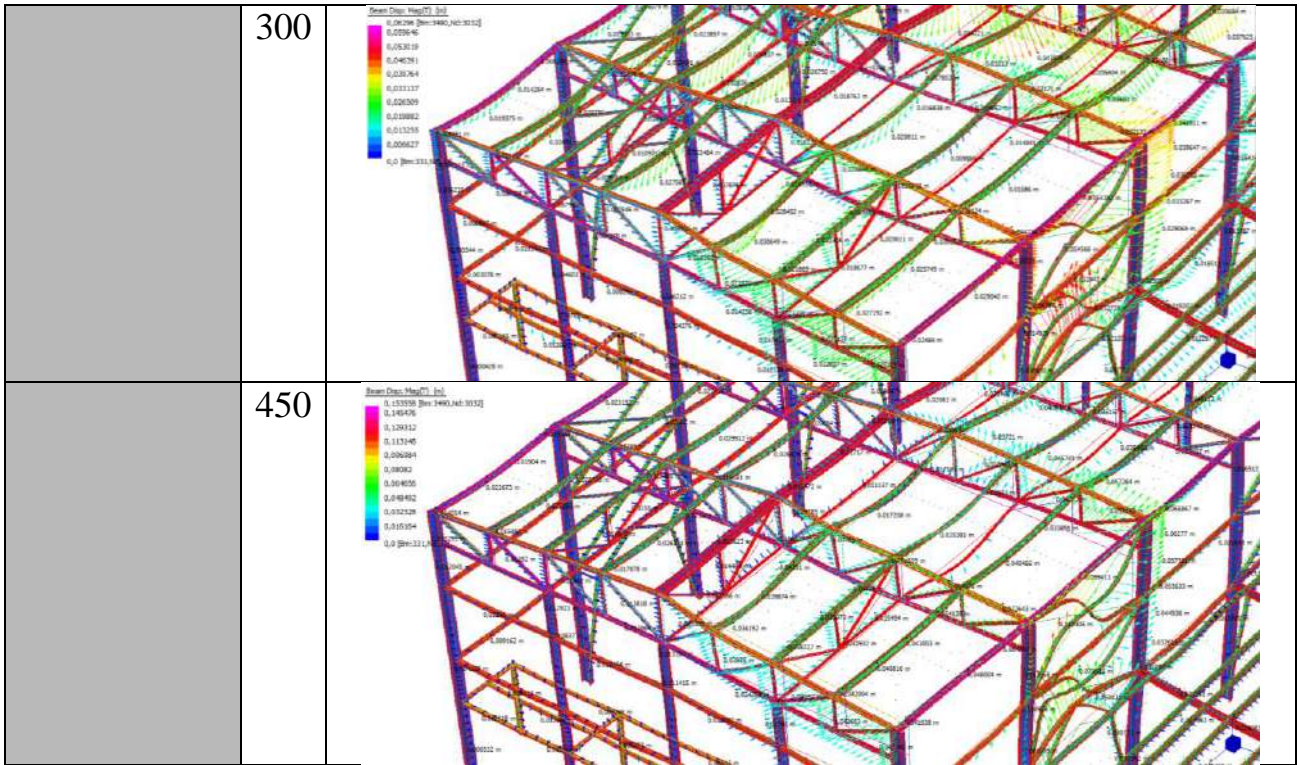
300	 <p>Beam Disp: Mag(T) [m] 0,379434 [Bm:5723,Nd:5265] 0,359464 0,319524 0,279583 0,239643 0,199702 0,159762 0,119821 0,079881 0,03994 0,0 [Bm:331,Nd:53]</p>
423	 <p>Beam Disp: Mag(T) [m] 0,428674 [Bm:5723,Nd:5265] 0,407059 0,361821 0,316502 0,271373 0,226144 0,180915 0,135606 0,090458 0,045229 0,0 [Bm:331,Nd:53]</p>
Scenario 1.1	 <p>Beam Disp: Mag(T) [m] 0,033910 [Bm:638,Abt:808] 0,030992 0,04506 0,039427 0,033795 0,028162 0,02253 0,016897 0,011265 0,005632 0,0 [Bm:331,Nd:53]</p>
100	 <p>Beam Disp: Mag(T) [m] 0,023462 [Bm:638,Abt:108] 0,00994 0,04447 0,038644 0,033128 0,027606 0,022085 0,016564 0,011043 0,005521 0,0 [Bm:331,Nd:53]</p>











FIRE SAFETY ENGINEERING

E' oggi possibile l'approccio alla progettazione antincendio con i metodi della Fire Safety Engineering. E' possibile, ad esempio, stimare con buona approssimazione l'andamento nel tempo delle temperature dei gas di combustione nelle varie zone del compartimento, in tutte le fasi dell'incendio.

A differenza del metodo prescrittivo, il progettista è libero di modellare l'incendio reale, al fine di determinare tra gli incendi attesi quello maggiormente probabile o quello più gravoso per la costruzione.

Già da tempo gli Eurocodici prevedono tale approccio, ma è solo con la pubblicazione delle NTC e del d.m. 9.3.2007 che per lo specifico aspetto si correla con il d.m. Interno 9.5.2007 recante "misure per l'attuazione del metodo ingegneristico alla sicurezza antincendio", che esso è stato ufficialmente attivato in Italia.

Nelle norme sopra indicate è riportato che a seconda dell'incendio convenzionale di progetto adottato, l'andamento delle temperature negli elementi può essere valutato in riferimento:

- Ad una curva di incendio nominale per un tempo di esposizione pari alla minima classe di resistenza al fuoco della costruzione
- Ad una curva di incendio, compresa la fase di raffreddamento fino al ritorno alla temperatura ambiente.

Nel caso di modellazione dell'incendio reale quindi, la curva di incendio dovrà descrivere il fenomeno per l'intera durata dello stesso fino al ritorno della temperatura iniziale. **Trattandosi di un ambito strutturale la temperatura cui non corrisponde più alcun pericolo per la costruzione stessa (ad esempio 200°C).** Questa condizione assume particolare significato per quelle situazioni in cui l'incendio, per particolare condizioni geometriche e di ventilazione, ritorna alla temperatura iniziale, a fine incendio, con un andamento delle temperature di tipo asintotico con asintoto orizzontale in corrispondenza della temperatura ambiente iniziale (ad esempio 20°C). La modellazione dell'incendio, come descritto oltre, è un'operazione particolarmente delicata che può essere percorsa attraverso metodi analitici più o meno complessi e onerosi. Sta alla capacità ed esperienza del progettista scegliere il modello più opportuno.

L'applicazione del modello fornisce una serie di parametri numerici utili alla descrizione dell'evoluzione dell'incendio e le indicazioni necessarie per verificare il soddisfacimento dei livelli di prestazione prefissati.

In questa fase si procede ad un'ottimizzazione delle scelte progettuali effettuate, scartando quelle che risultano poco soddisfacenti e affinando quelle che siano risultate più valide sotto il profilo della sicurezza.

Nel nostro caso si utilizzerà un modello a due zone, ovvero un modello che calcola le condizioni che si determinano nell'ambiente dividendo ogni compartimento in due zone omogenee. Una è quella superiore, dei fumi e gas caldi dove sono presenti i prodotti della combustione. L'altra è la zona inferiore, libera da fumo e più fresca di quella superiore.

Il rapporto di altezza tra le due zone cambia con lo sviluppo dell'incendio.

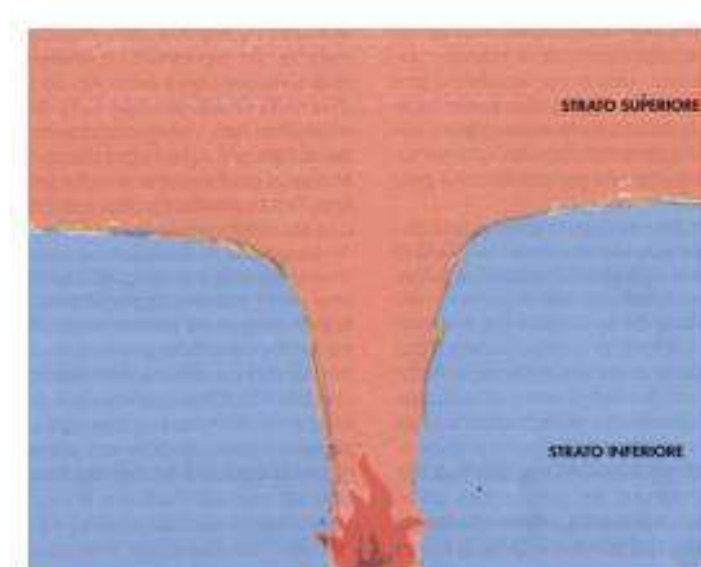


Figura 0.1-Zone a temperatura differente

I modelli a zona stimano in funzione del tempo:

- Le temperature medie dello strato inferiore e superiore;
- La posizione dell'interfaccia tra le zone;
- La concentrazione di ossigeno;
- La visibilità;
- Il flusso in entrata ed in uscita da aperture verso l'esterno o verso altri locali;

Tali informazioni sono essenziali per stimare le condizioni di sostenibilità di un compartimento o per determinare se si può verificare il flashover.

I modelli a zone si applicano sia a ambienti semplici, sia ad ambienti collegati tra loro da aperture.

I dati per i modelli a zone variano dal modello e dalle informazioni che si desidera ottenere. Generalmente, in questi modelli i dati di input sono molto più esigui rispetto a quelli richiesti per i modelli di campo. Sono necessari dati sulla geometria del compartimento e sulle dimensioni e posizione delle aperture.

La conoscenza delle proprietà termiche delle pareti di confine del compartimento è necessaria per stimare la dispersione del calore attraverso muri, soffitto, solai ecc. Inoltre, deve essere fornita, tra i dati di input anche la dimensione del focolaio iniziale.

Per varie applicazioni è sufficiente un livello di dettaglio non complesso come quello dei modelli fluidodinamici.

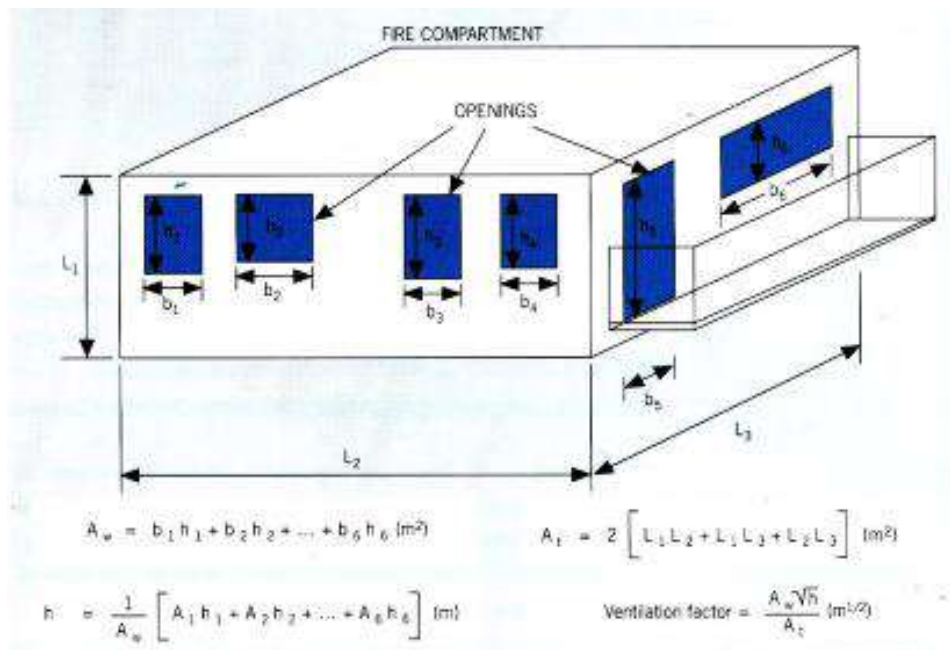
Un modello a zone, detto anche a parametri concentrati, divide i locali in esame in differenti volumi di controllo. I più comuni modelli dividono una stanza in due zone, una zona superiore calda e una zona inferiore fredda.

Per essere in grado di utilizzare le equazioni alla base di questi modelli si devono fare alcune ipotesi semplificative:

- Il pennacchio del focolaio agisce come una pompa di massa, costituita dalle particelle di fumo, e riscalda la zona superiore. Tuttavia, il volume occupato dal pennacchio del focolaio viene ipotizzato piccolo in confronto alle zone superiore e inferiore.
- Il fumo si stratifica in due strati distinti, come può essere osservato negli incendi reali. Inoltre gli strati sono ipotizzati uniformi al loro interno.
- Non si considera la propagazione delle fiamme agli arredi circostanti.

I dati di ingresso sono:

- La geometria della stanza;
- I materiali che compongono la stanza, includendo tutti i muri, il pavimento e il soffitto,
- Curva HRR
- Il numero di finestre o aperture e le loro dimensioni;



Ancora:

- Le caratteristiche degli arredi della stanza;
- Quota di rilascio termico;
- Tipo e quantità del combustibile;
- Sistemi di ventilazione forzata;
- Sistemi sprinkler;
- Sistemi di rilevazione;

I risultati in uscita sono di solito la previsione del tempo di attivazione del sistema sprinkler o del rilevatore di incendio, il tempo per raggiungere il flashover, la temperatura dello strato superiore e inferiore, l'altezza dello strato di fumo e i tipi di prodotti rilasciati dalla combustione.

I modelli a zone non possono tenere accuratamente in conto la radiazione di ritorno dal contorno. La quota di rilascio termico non è un risultato in uscita, devono essere fatte prove sperimentali per determinare le dimensioni del fuoco ed è necessaria una buona esperienza ingegneristica per modellare in modo corretto ogni caso di studio.

Tra i modelli a zone si utilizza CFAST, Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, sviluppato dai gruppi di ricerca del BFRL, Building and Fire Research Laboratory, dell'ente statunitense NIST, National Institute of Standards and Technology.

FAST è una raccolta di procedure che permette al modello informatico CFAST di fornire una stima ingegneristica del rischio di incendio sulle strutture di un compartimento.

Le funzioni principali fornite sono:

- La produzione di entalpia e massa di fumi e gas da uno o più oggetti incendiati in una stanza, basato su misure effettuate su piccola o grande scala.
- Lo spostamento o forzato di questa energia e massa attraverso una serie di specifiche stanze e connessioni, come porte, finestre o condotte.
- Le temperature risultanti, le densità ottiche di fumo e la concentrazione di gas, dopo avere tenuto conto del trasferimento di calore alle superfici e la diluizione attraverso il mescolamento con aria pulita.

CFAST è un modello a due zone usato per calcolare l'evoluzione della distribuzione di fumo e gas dell'incendio e la temperatura all'interno di un edificio durante un incendio. Esso è basato sulla risoluzione di una serie di equazioni che determinano le variabili di stato (pressione, temperatura...) basandosi sul flusso di entalpia e massa durante piccoli incrementi di tempo.

Equazione differenziale della massa nel piano i-esimo	$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i$
Equazione differenziale della pressione	$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma-1}{V} (\dot{h}_i + \dot{h}_v)$
Equazione differenziale della energia nel piano i-esimo	$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} (\dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dT})$
Equazione differenziale del volume nel piano i-esimo	$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\gamma P} ((\gamma-1)\dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dT})$
Equazione differenziale del densità nel piano i-esimo	$\frac{d\rho_i}{dt} = -\frac{1}{c_p T_i V_i} ((\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) - \frac{V_i}{\gamma-1} \frac{dP}{dT})$
Equazione differenziale del temperatura nel piano i-esimo	$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_i V_i} ((\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dT})$

Queste equazioni derivano dalle equazioni di conservazione dell'energia e dalla massa, della quantità di moto e la legge dei gas ideali. Gli errori che possono essere commessi, non possono derivare da tali equazioni, ma piuttosto vengono dalla rappresentazione numerica delle equazioni o dalle ipotesi semplificative.

L'ipotesi di base di tutti i modelli di incendio a zona è che ogni stanza può essere divisa in un piccolo numero di volumi di controllo, ognuno di esse presenta al proprio interno uniformità di temperatura e composizione. In CFAST, tutte le stanze hanno due zone ad eccezione della stanza dove si trova l'incendio, che ha zone aggiuntive per il pennacchio del focolaio e il getto sul soffitto, che sono calcolati separatamente per tenere conto del trasferimento di massa e calore tra le zone e tra le zone e le superfici del compartimento. Per simulare la crescita dell'incendio, il sistema usa un fuoco

definito dall'utente, che esprime in funzione dell'incendio, specifiche quote di energia e massa rilasciate dagli oggetti incendiati. Determinazioni individuali vengono fatte sia per l'invalidità e la letalità dovute alla temperatura e alla tossicità.

Quindi CFAST ha una metodologia di calcolo affidabile, è caratterizzato da una documentazione altamente dettagliata.

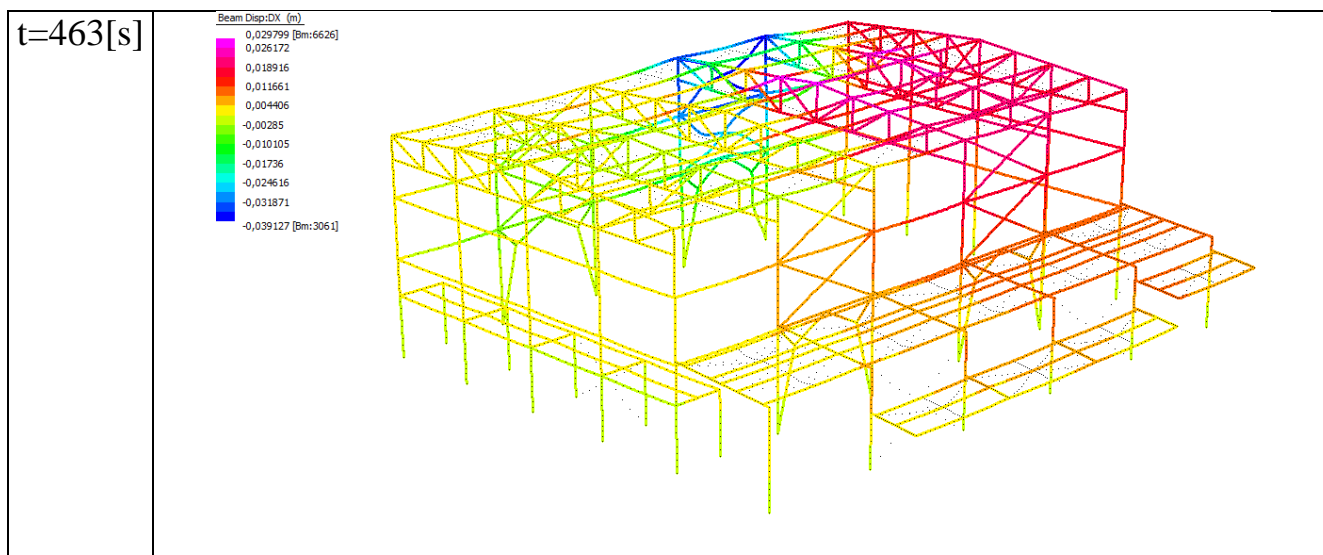
Il codice presenta anche alcune limitazioni: Il modello CFAST non include un modello per la crescita dell'incendio. Non sono al momento incluse interazioni tra temperatura e la tossicità. Il modello contenuto in CFAST è stato creato e validato per la simulazione di incendi in spazi confinati caratterizzati da dimensioni geometriche proprie degli edifici di civile abitazione o industriali. Per questi motivi, in tutti gli scenari per i quali le dimensioni dei locali si differenziano, per dislocazione e geometria, le valutazioni del modello non potranno che essere affette da un certo grado di incertezza.

1 OBIETTIVO DELL'ANALISI

Note le precedenti simulazioni in ambiente FEM, è possibile estrapolare lo scenario maggiormente critico ai fini della stabilità globale della struttura.

Lo scenario che si prende in considerazione sarà il numero 1.2, con struttura imperfetta, in quanto:

- Si analizzano gli scenari localizzati in quanto non si raggiunge la condizione di flashover e l'incendio localizzato non risulta una soluzione veritiera;
- Gli scenari tipo 1.x sono quelli con maggiori spostamenti verso la struttura da proteggere e quindi possibilità maggiori di crollo laterale sul fabbricato esistente;
- Nello scenario 1.2 si registrano maggiori spostamenti verso la struttura da proteggere rispetto lo scenario 1.1, e quindi rappresenta lo scenario con una maggiore possibilità di collasso laterale verso la seconda struttura.
- Lo scenario 1.2 con struttura imperfetta si preferisce allo scenario 1.2 con struttura perfetta in quanto si ha un collasso prematuro dovuto alla distribuzione di forze concentrate in direzione X.



Gli spostamenti massimi registrati sono compresi tra i 4-5 cm in sommità dei pilastri soggetti all'incendio localizzato (nodo 2 e 3) con curva di riscaldamento derivante dalla ISO834.

Inoltre nel nodo 4 e 5 si nota un'inversione di segno nello spostamento che denota un collasso di tipo implosivo con effetto di trascinarsi delle altre membrature.

In questo caso si nota un tempo di collasso, legato alla perdita di resistenza della struttura, pari a 463 [s] che sarà il tempo critico di progetto.

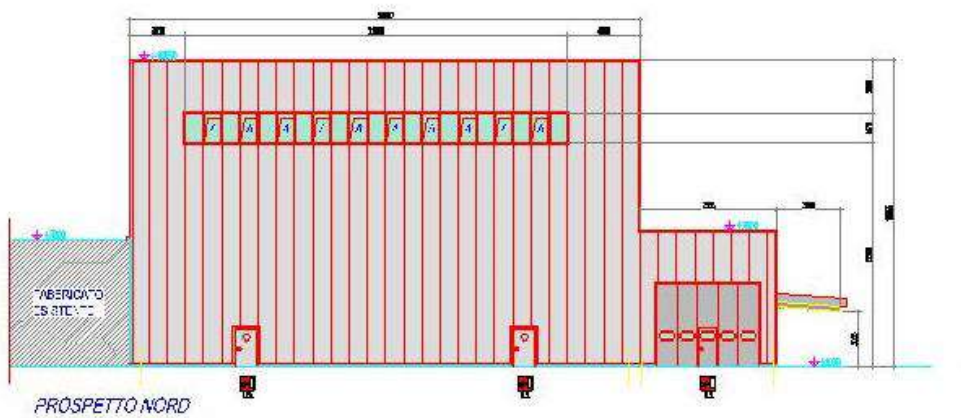
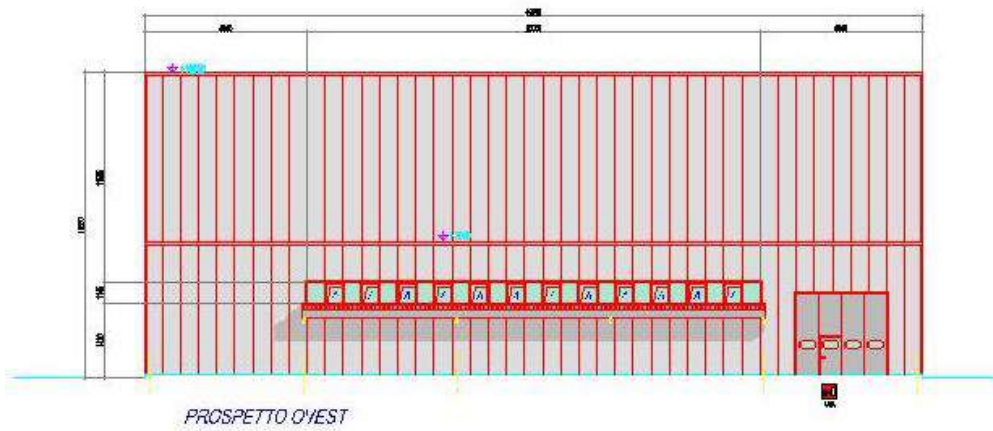
Considerando che nel modello sono state applicate ai nodi le curve di riscaldamento derivanti dalla ISO 834 è possibile dedurre da quest'ultima, restando chiaramente a favore di sicurezza, la **temperatura critica della struttura** alla quale collassa pari a **570°C**.

Risulta chiaro tenere a mente questo valore di temperatura durante tutta la fase di simulazione d'incendio, progettazione e verifica della struttura, in quanto sarà il nostro target dal quale dobbiamo tenere un opportuno margine di sicurezza.

2 GEOMETRIA DEL PROBLEMA

Le simulazioni di incendio in argomento sono state condotte in un dominio di calcolo di forma parallelepipedica di dimensioni complessive 27 m x 42 m x 16 m per il magazzino e 27 m x 42 m x 8m per il collettame. Il compartimento è stato supposto realizzato con pannelli sandwich opportunamente collegati alla struttura in acciaio, di densità $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$, calore specifico $c_p = 1.37 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, conducibilità termica $k =$

0.000022W/ m·K. Il dominio considerato è dotato di n.4 finestre a nastro, due porte e due portoni come riportato nei prospetti.



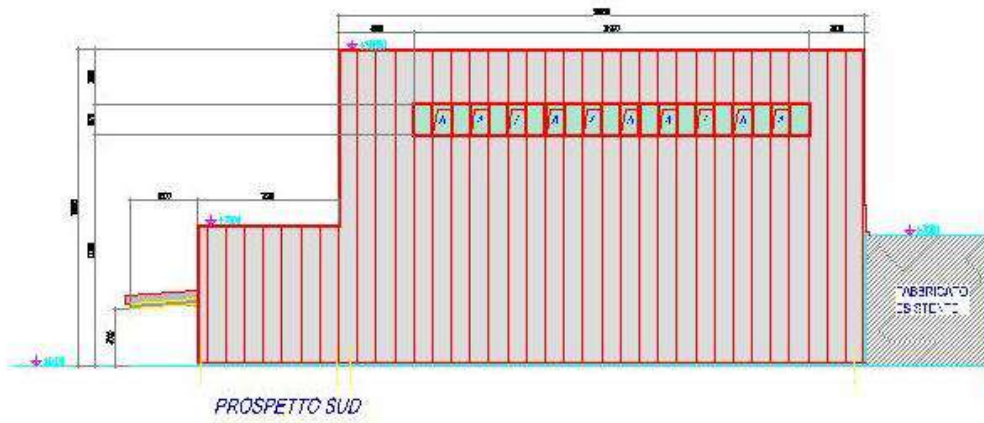


Figura 2.1-Prospetti

Di seguito si riporta la distribuzione in pianta delle pareti divisorie.

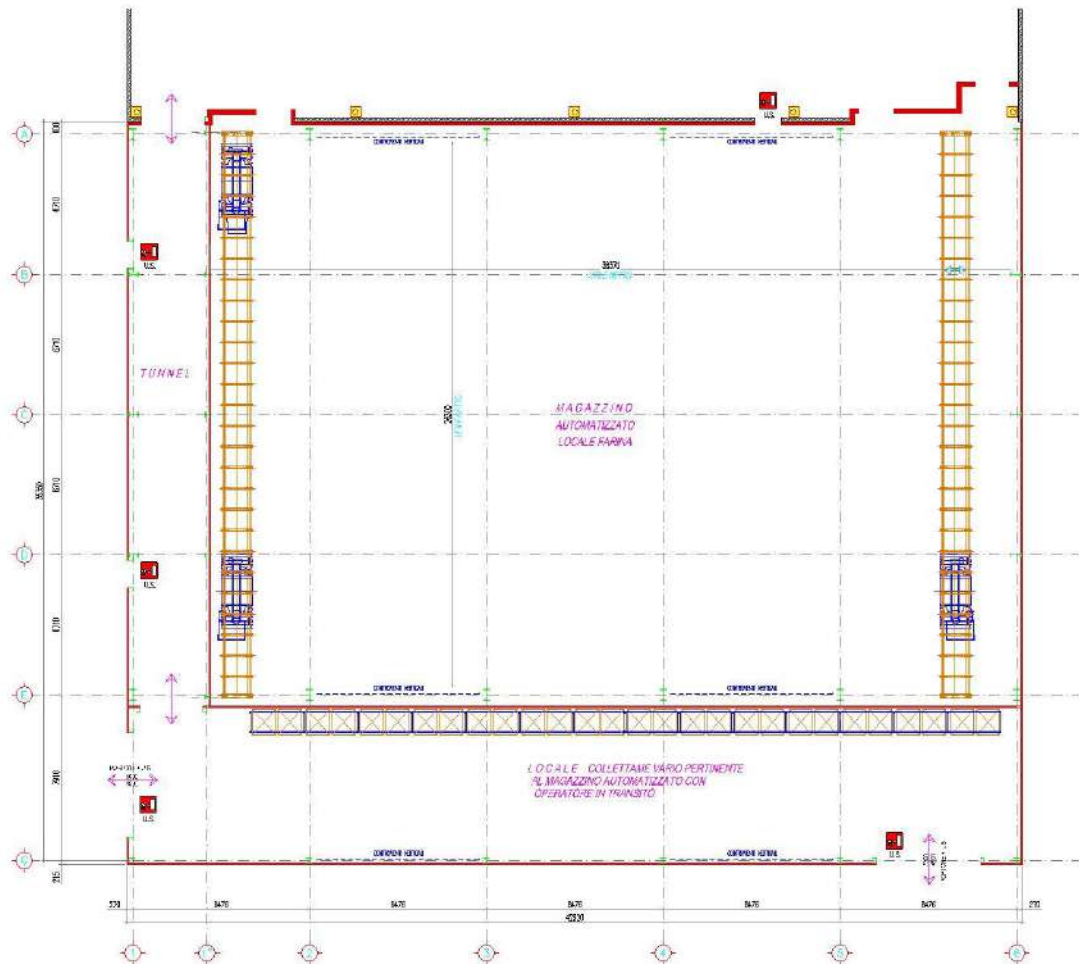


Figura 2.2-Planimetria

Inoltre la struttura sarà dotata di 3 lucernari in copertura, con dimensioni di 1m x 20m, formati da pannelli basso fondenti che tenderanno ad aprirsi alla temperatura di 350°C, disposti longitudinalmente.

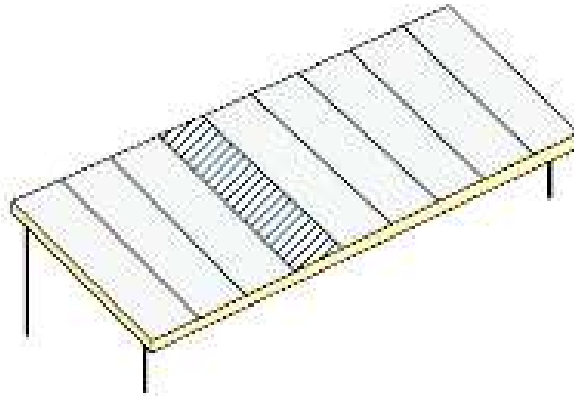


Figura 2.3-Pannelli bassofondenti

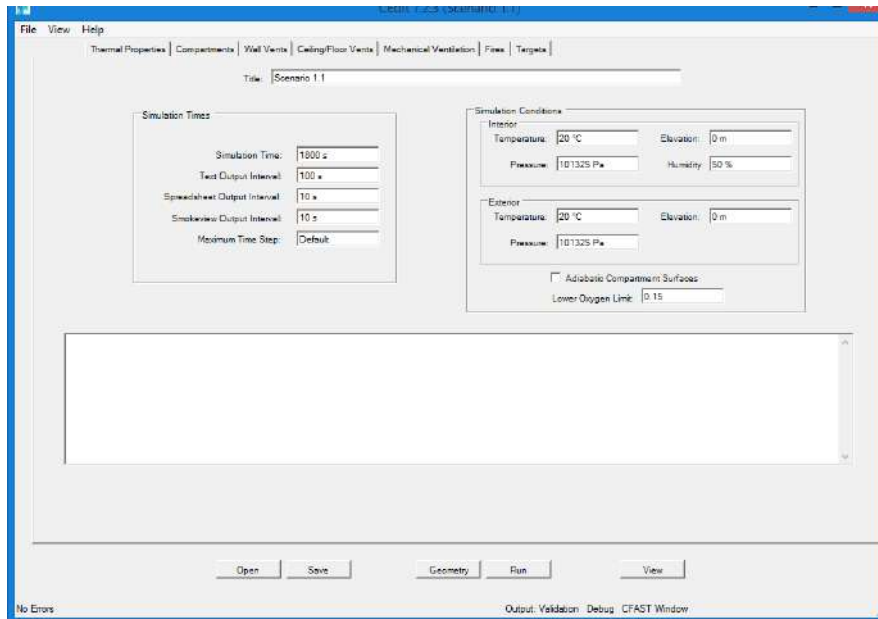
Si nota che il magazzino è completamente separato dai locali adiacenti da pannelli sandwich in PUR.

3 MODELLIZZAZIONE SU CFAST

1. Simulazione

Dopo aver assegnato un titolo al file si determina il tempo di simulazione dell'analisi, nel nostro caso 30min, e si determina i tempi di campionamento in cui il software ci restituirà una soluzione nel file testo di output e in Smokeview.

Si applica una temperatura ambiente iniziale e una pressione interna ed esterne al locale.



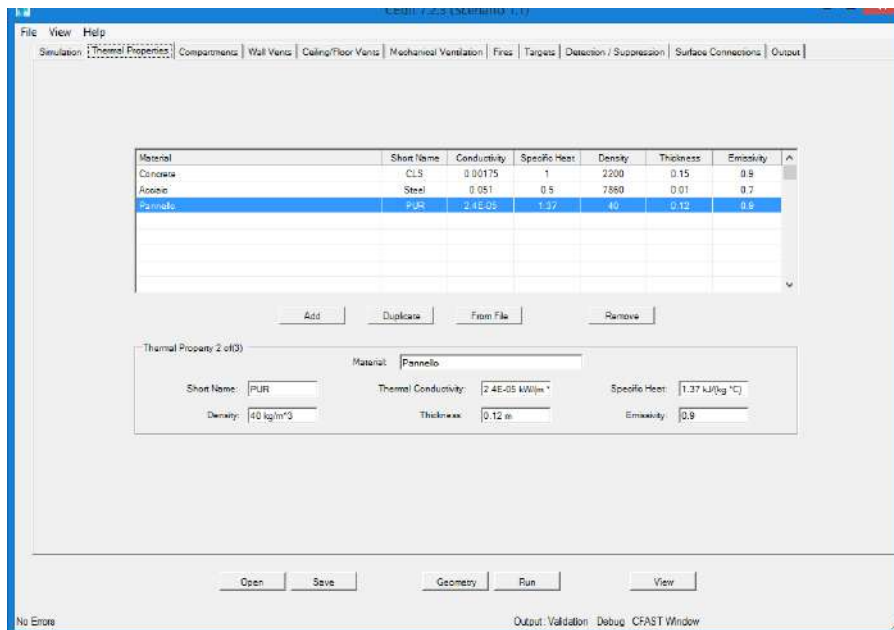
2. Proprietà termiche

Si assegnano tutte le caratteristiche termiche dei diversi materiali componente la struttura:

- CIs per la rappresentazione della pavimentazione
- Pannelli in PUR per la rappresentazione dei pannelli di tamponamento
- Acciaio per la creazione dei targets in cui leggeremo la temperatura da assegnare alla struttura in acciaio

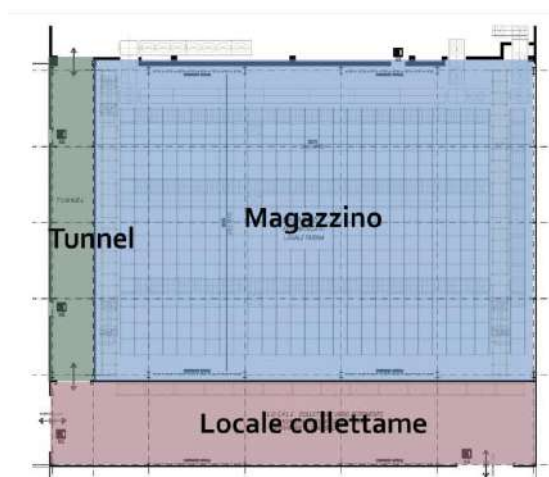


Figura 3.1-Pannelli PUR

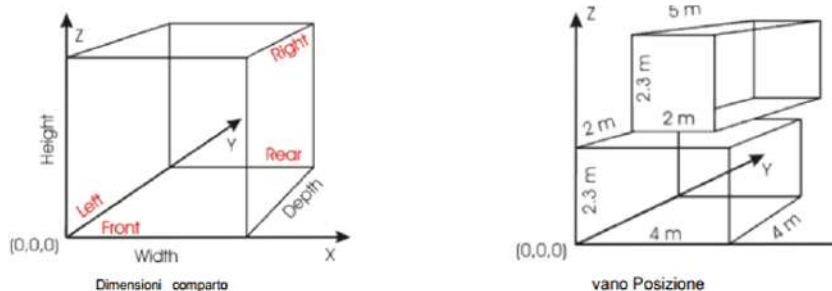


3. Locali

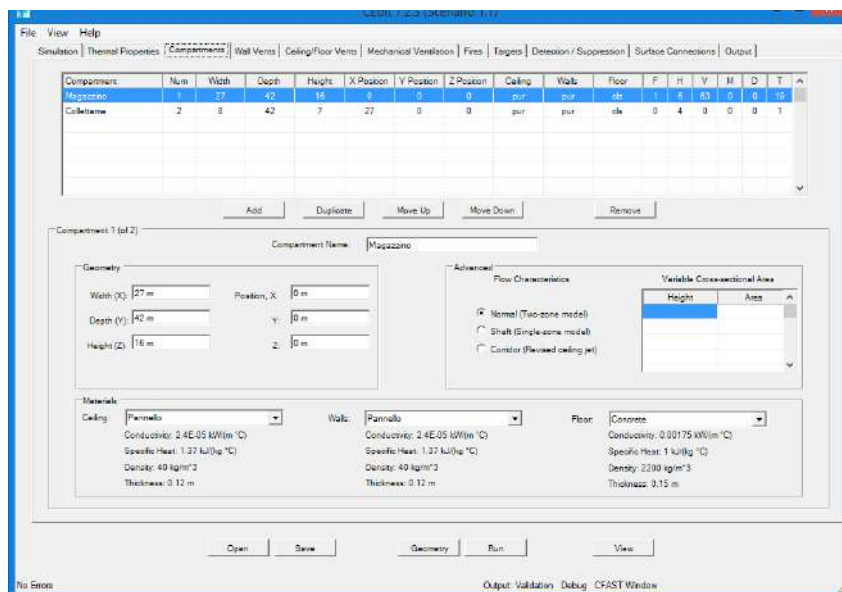
Si inseriscono le coordinate per la creazione dei due locali, ovvero magazzino, tunnel e collettame.



Assegnate le dimensioni si inseriscono gli offset dei tre locali secondo il sistema di riferimento.



Si assegnano i materiali alle diverse superfici costituenti i locali



4. Aperture laterali

Si inseriscono le grandezze geometriche delle diverse aperture laterali e i diversi offset.

Inoltre si modella l'apertura delle finestre per shock termico assegnando una temperatura target di 200°C raggiunta da target successivamente modellati.

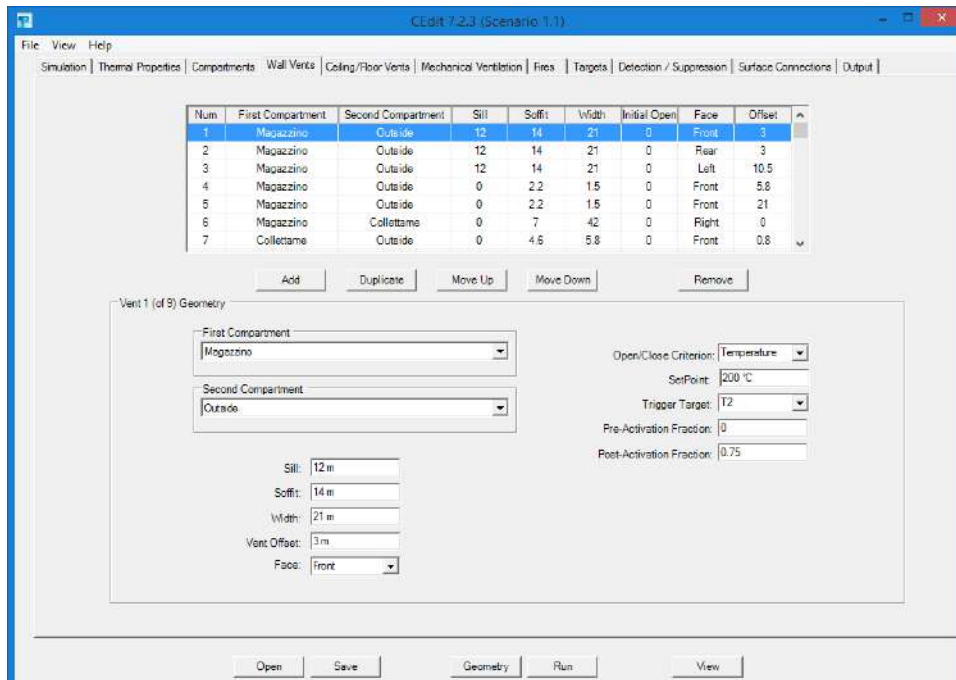
Si modella anche un'eventuale rottura/apertura delle porte a causa delle elevate temperature. In questo caso il target è di 400°C.

Si inserisce anche la percentuale di apertura pari al 75% per porte e finestre a nastro in quanto nella realtà è possibile che non tutta l'apertura, dopo lo scoppio, risulti libera.

Questo valore sarà tenuto in conto nel calcolo dell'RHR.



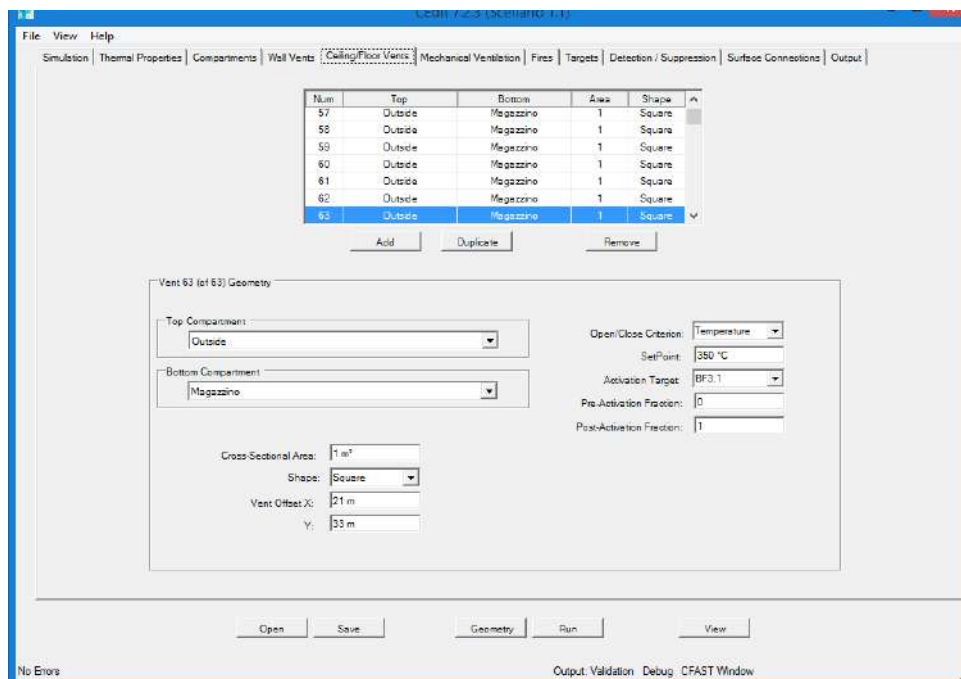
Figura 3.2-Schock termico



5. Aperture orizzontali

Si modellano anche i tre lucernari composti da pannelli bassofondenti.

I pannelli bassofondenti avranno come target di apertura la temperatura di 350°, raggiunti da differenti target disposti lungo i pannelli, in modo da simulare l'effettiva apertura differita nel tempo.



6. Incendio

In questa fase si rappresenta l'incendio che si sviluppa nel magazzino, dove sono presenti i sacchi di farina trasportati dalla macchina automatizzata.

Si presume che l'incendio nasca dalla posizione rappresentata nello scenario 1.2. Si modella anche che la base della fiamma cresca nel tempo fino a ricoprire l'intera area d'influenza dell'incendio in scenario 1.2 sulla struttura.

Si richiede l'input della curva HRR calcolata seguendo le disposizioni del codice di prevenzione incendi, nella sezione M (metodi) *capitolo M.2 scenari d'incendio per la progettazione prestazionale, paragrafo M2.6 Stima della curva RHR.*

si=1 no=0	Limitato dalla ventilazione?						1	
DATI								
X locale	26.8	m	A _f superficie lorda del compartimento in caso di distribuzione uniforme del carico d'incendio, oppure superficie lorda effettivamente occupata dal combustibile oppure area operativa di sistemi automatici di controllo dell'incendio [m ²]					
Y locale	38.8	m						
A _f		1039.84		m ²				
Aperture verticali								
n°	hi [m]	Sill	Soffit	Widht	Av,i [m ²]	Av,i*hi [m ³]	W _{vent,i} *h _{vent} ^{1.5}	Note
1	1.2525	12	14	15.75	19.72688	24.7079109	22.07736104	finestra
2	1.2525	12	14	15.75	19.72688	24.7079109	22.07736104	finestra
3	1.2525	12	14	15.75	19.72688	24.7079109	22.07736104	finestra
4	1.65	0	2.2	1.125	1.85625	3.0628125	2.384396297	porta
5	1.65	0	2.2	1.125	1.85625	3.0628125	2.384396297	porta
6						0		
7						0		
8						0		
9						0		
10						0		
11						0		
m				1				
t _α				150		deposito intensivo		

h strut.			16.8	m		
Aree			lato [m]	m2		
Pareti	1		42.9	720.72		
	2		42.9	720.72		
	3		28	470.4		
	4		28	470.4		
Soffitto	5			1039.84		
Pavimento	6			1039.84		
At				4461.92		

t_alfa	150	s		m	0.8	-
tA	1495.947877	s		Hu	17.5	MJ/kg
tB	260696.1879	s		Av	62.89313	m2
tC	483295.2359	s		heq	1.275964	m2
				RHRmax	99460.45	kW
qf	35485.90931	MJ/m2		RHRmax	99.46045	MW
qf	35485909.31	kJ/m3				

Di seguito si analizza la possibilità di sviluppo del flashover che comporterebbe non più un incendio localizzato, ma di tipo generalizzato.

Affiche ci sia il flashover si devono verificare due condizioni:

1. A seguito di prove di laboratorio (Kawagoe) è stato riscontrato che quando l'incendio raggiunge il suo massimo sviluppo la sua propagazione e la sua progressione dipende SOLO da uno specifico parametro, ovvero il fattore di ventilazione O:

$$O = \left[A_V \sqrt{h_{eq}} \right] / A_t$$

Se il fattore di ventilazione risulta superiore a $O > 0.06-0.07$ esiste la possibilità di flashover;

2. Applicando il metodo di Thomas, tale procedimento è anche indicato nella norma NFPA 555. Eseguendo un bilancio energetico sullo Strato di gas caldi che si forma nel soffitto di un locale ed esaminando i risultati ottenuti nell'esecuzione di numerosi incendi naturali, nell'ipotesi che al raggiungimento del flashover la temperatura dei gas sia di circa 600°C, è stata elaborata la seguente espressione che stima il minimo valore della potenza termica RHR_f , espressa in kW, che l'incendio deve rilasciare all'interno di un locale di determinate dimensioni e superfici di ventilazione affinché in esso si produca il flashover:

$$RHR_f = 7.8A_T + 378 A_{Vequiv} * h_{vequiv}^{0.5}$$

In cui:

- $A_{Vequiv} = W_{Vequiv}h_{Vequiv}$ dove A_{Vequiv} è espressa in m^2 e W_{Vequiv} ed h_{Vequiv} sono le dimensioni, entrambe misurate in m, di un apertura di ventilazione ricavata nella parete e che è equivalente ai fini del calcolo della potenza termica necessaria per produrre il flashover;
- h_{Vequiv} rappresenta la differenza in m fra l'altezza del punto più alto e quella del punto più basso fra tutte le aperture di ventilazione presenti nelle pareti;
- W_{Vequiv} è la larghezza, espressa in m, della predetta apertura equivalente che viene calcolata imponendo che il fattore di ventilazione del locale nel quale sia presente solamente tale apertura virtuale sia pari alla somma dei fattori di ventilazione delle singole aperture realmente presenti aventi dimensioni generiche $W_{vent,i}$ ed $H_{vent,i}$; si ottiene, quindi, la seguente espressione:

$$W_{Vequiv} = \frac{W_{vent,i}h_{vent,i}^{1.5}}{h_{Vequiv}^{1.5}}$$

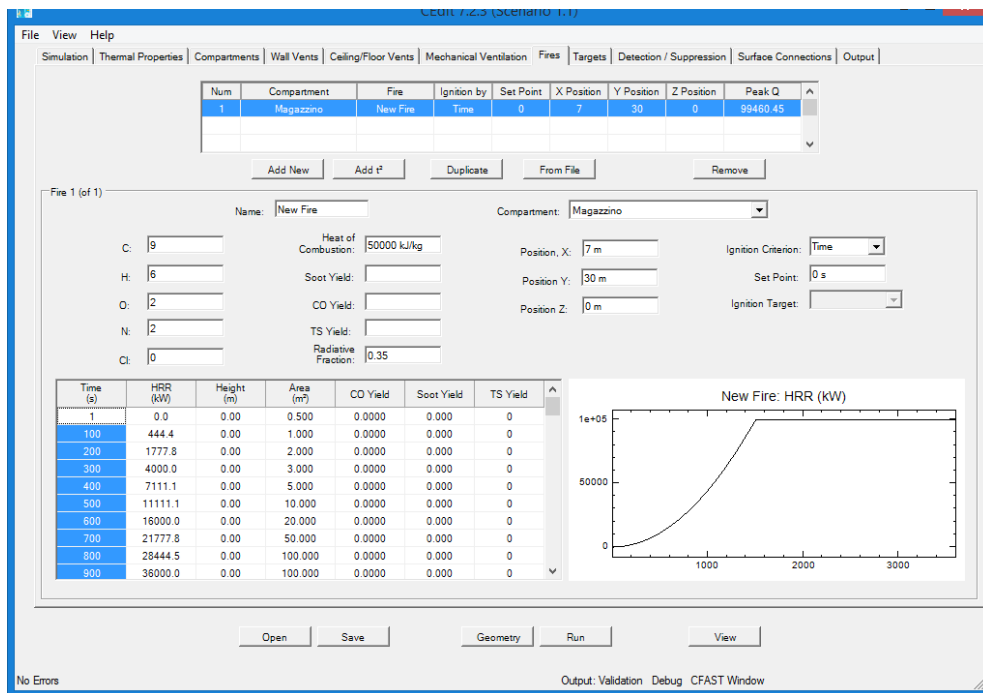
- A_T è espressa in m^2 e rappresenta la differenza fra la superficie totale del locale e l'area A_{Vequiv}

Se $RHR_f < RHR$ si verifica il flashover.

O	0.015922109	
THOMAS		
hveq	14	m2
Wvequ	1.355413016	m2
Avequi	18.97578222	m2
AT	1020.864218	m2
RHRF	34801.07192	kW

3. Permetta ermeticità del locale durante l'incendio e assenza di danneggiamenti di superfici vetrate che possano far entrare aria fresca dall'esterno per una quantità tale da far avvenire una combustione controllata dalla ventilazione.

Nel nostro caso non si verifica il Flashover in quanto sono state modellate le rotture delle finestre e lucernari che mantengono la temperatura al di sotto dei 600°C con distribuzione uniforme nell'intero dei locali, inoltre il fattore di ventilazione è al di sotto del condizione di Flashover.



7. Targets

Si inseriscono dei targets in acciaio in tutti punti in cui si vuole campionare la temperatura, in particolare si avranno due famiglie di targets:

- Targets per l'apertura dei bassofondenti e delle finestre;
- Targets per l'individuazione della curva naturale d'incendio

Relativamente ai secondi tipi di targets si posizionano 5 elementi; ovvero 1 sull'incendio per determinare le temperature a cui sono sottoposte le capriate nello scenario localizzato 2.1 e altri 4 distribuiti nel locale per individuare le altre temperature a cui la restante struttura è assoggettata.

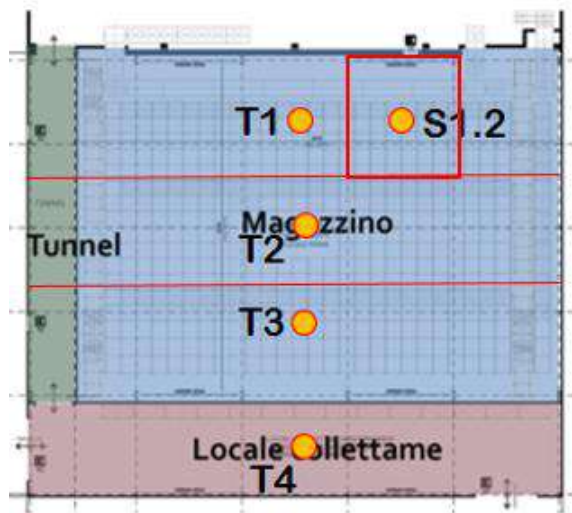
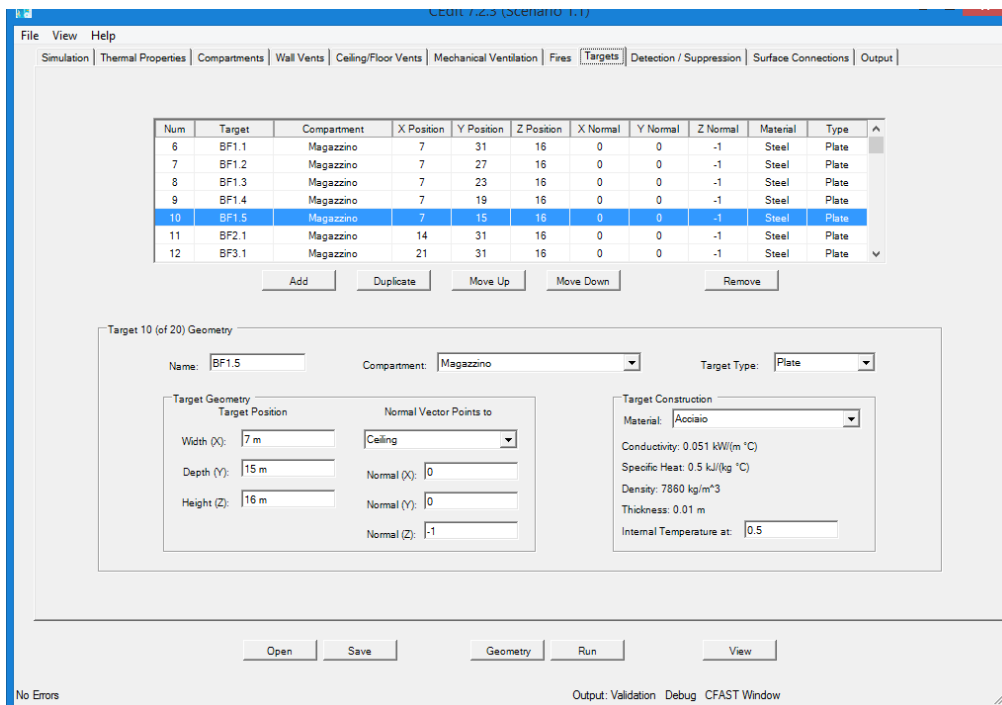
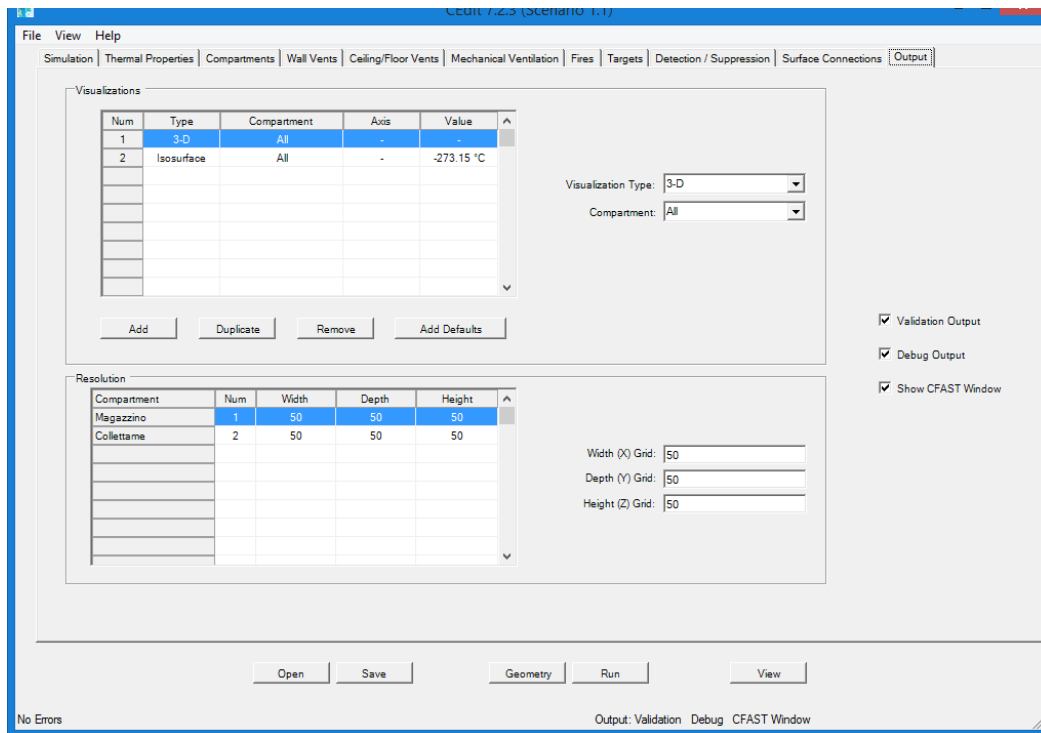


Figura 3.4- Suddivisione in zone del locale magazzino per l'individuazione dei target



8. Output

Si individuano delle sezioni su cui andare a studiare su Smokeview l'andamento dei diversi parametri riguardanti l'incendio.



4 RISULTATI DELL'ANALISI

Di seguito si rappresenta la geometria della struttura modellata e l'andamento nel tempo delle temperature.

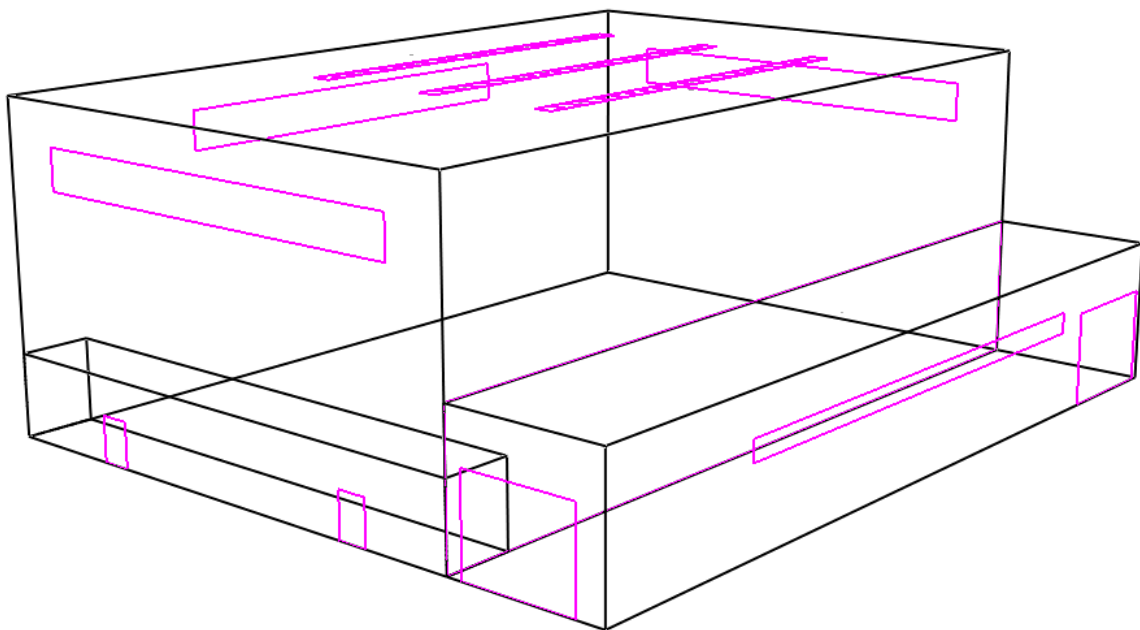
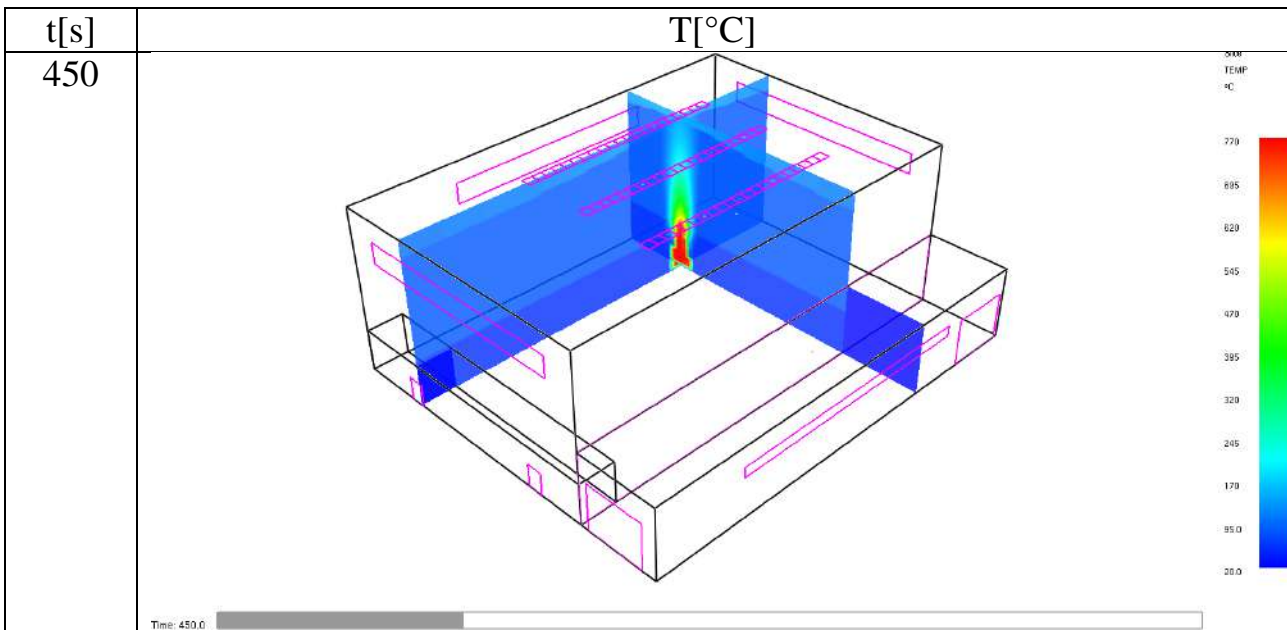
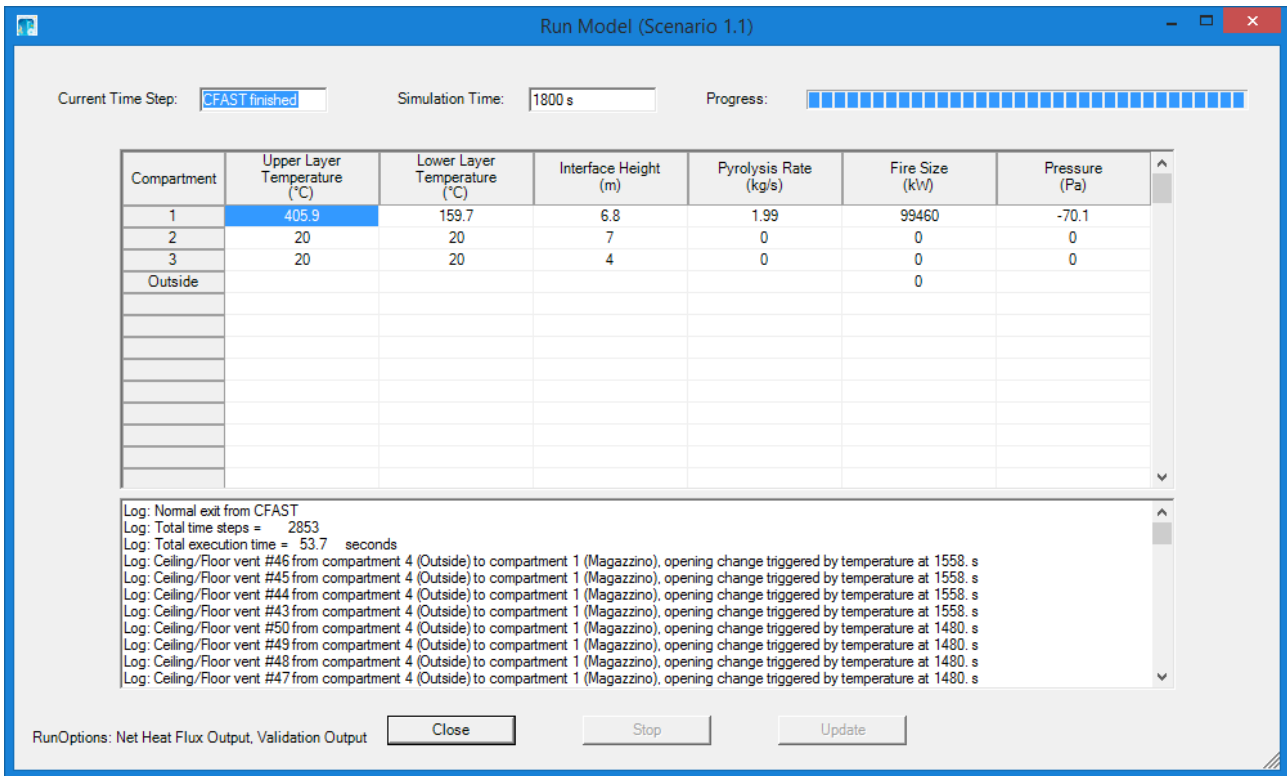
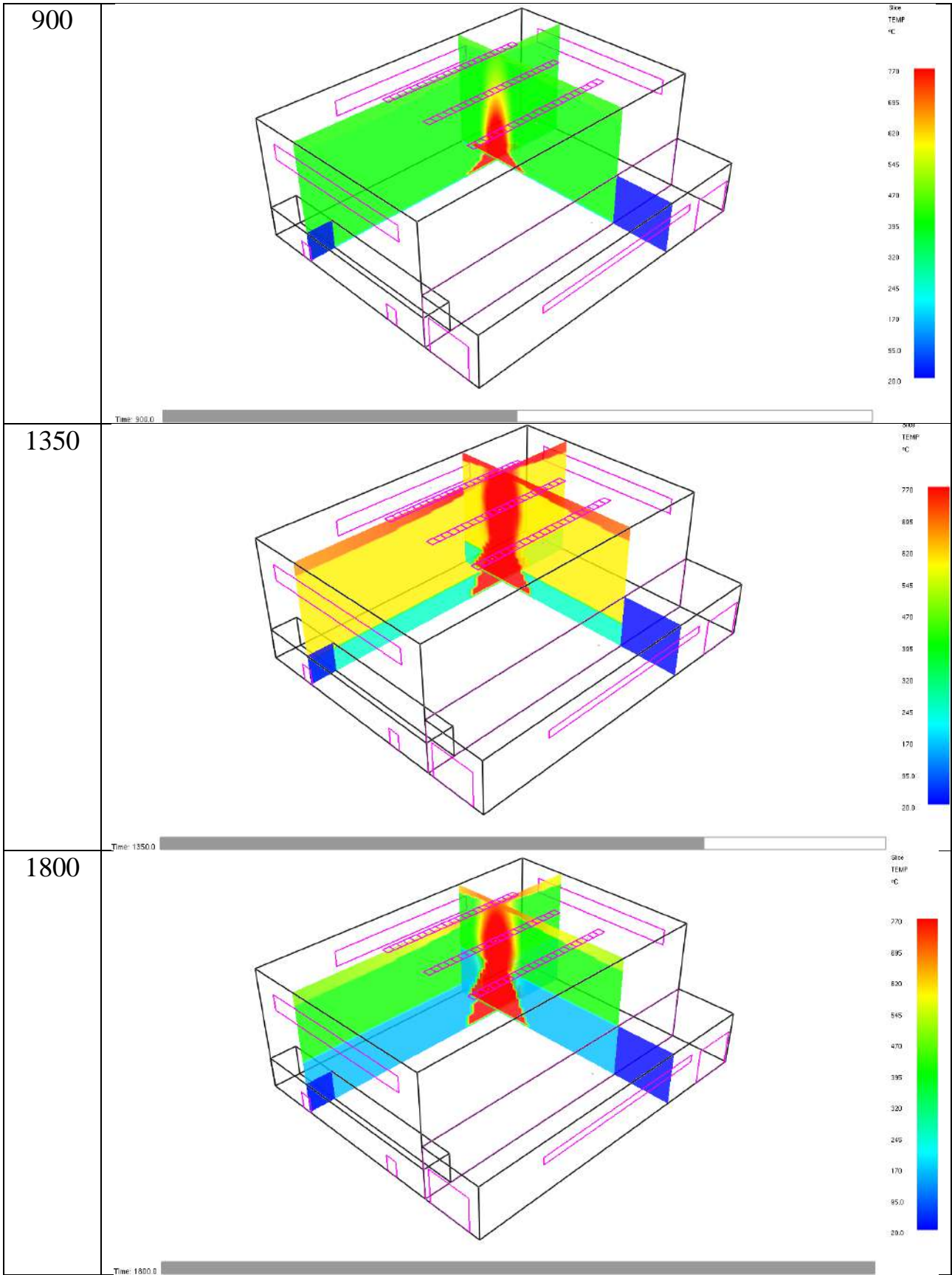


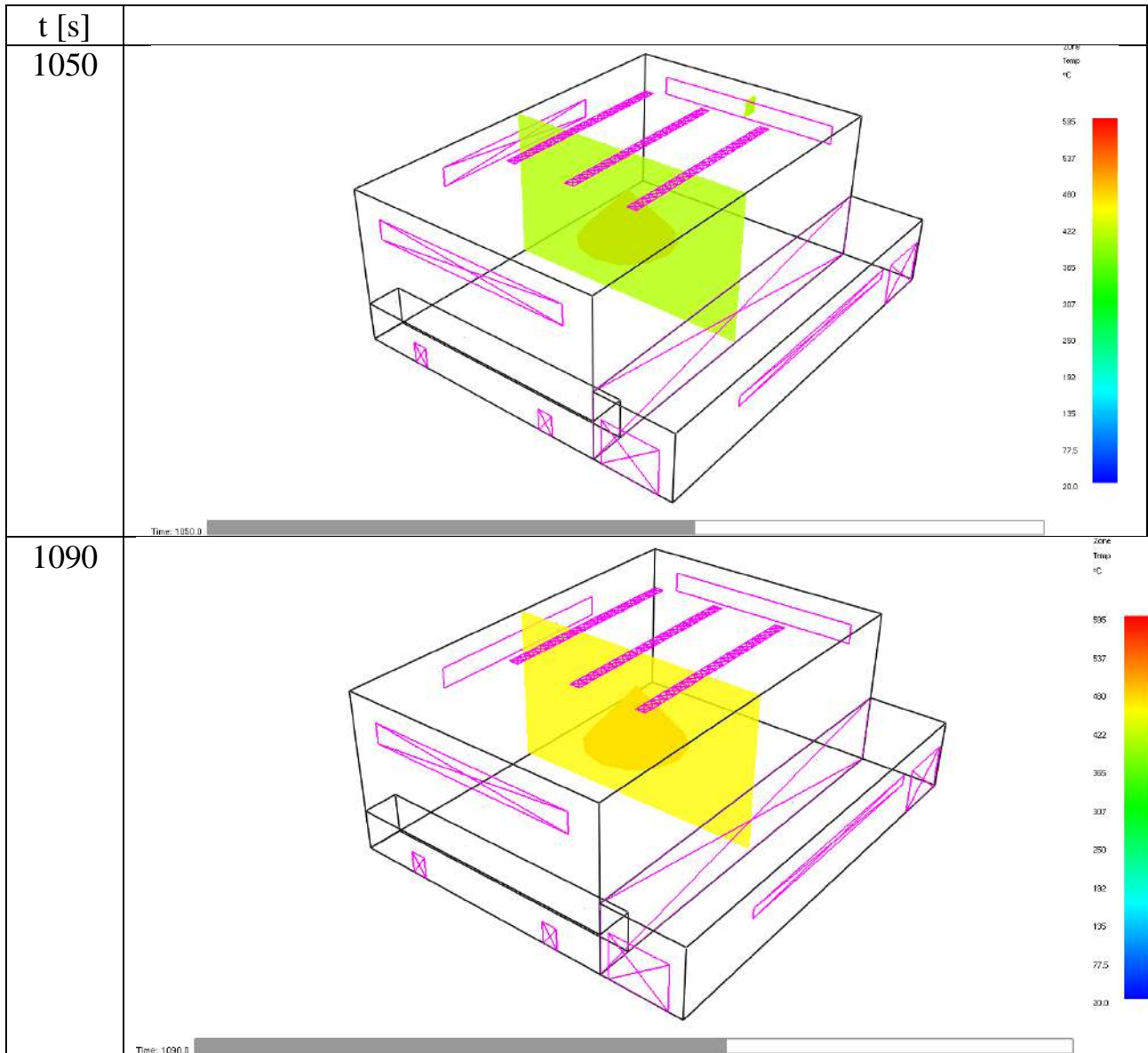
Figura 4.1-Modello in Cfast

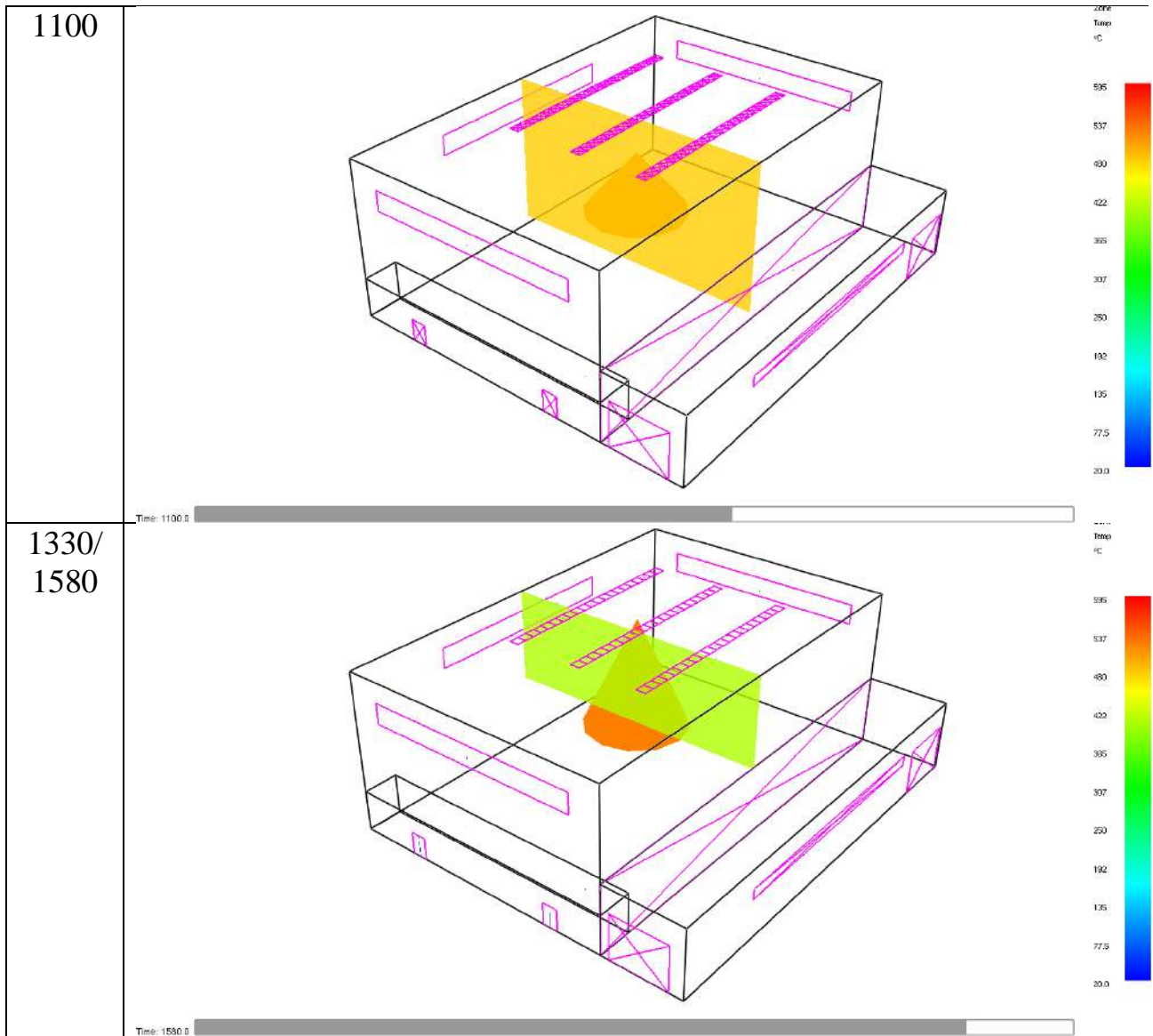
Alla fine dell'analisi si registrano le seguenti temperature per i due strati



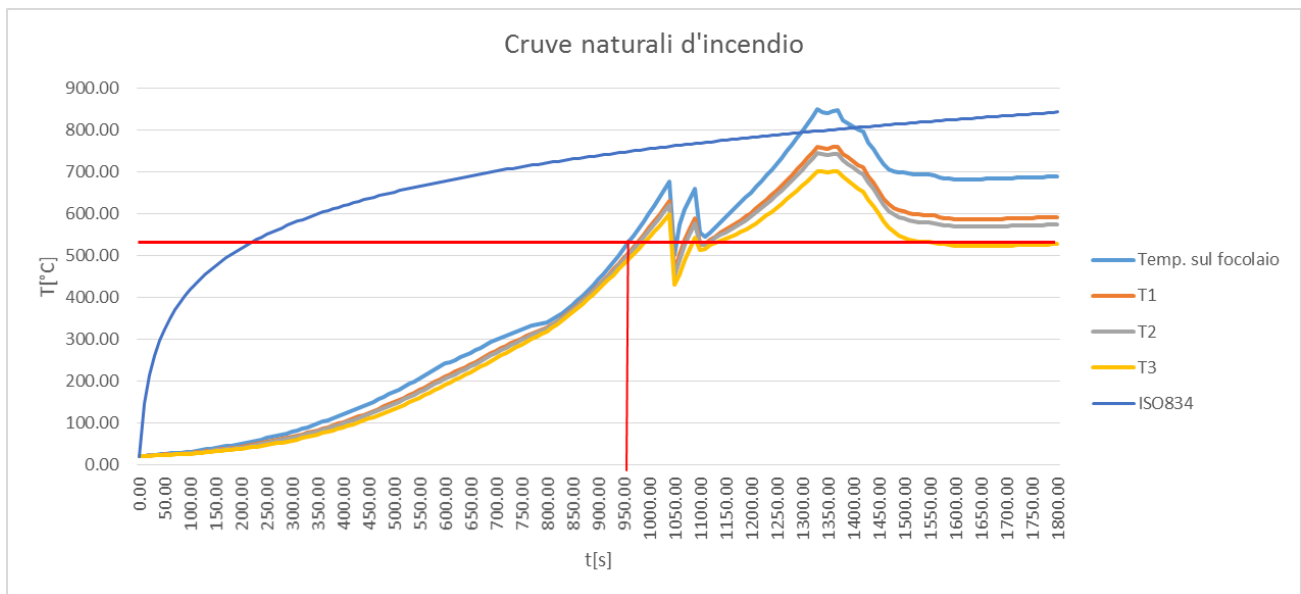


Si riportano gli istanti in cui si rompono i vetri per shock termico e l'apertura dei bassofondenti:





Di seguito si riportano gli andamenti delle curve naturali d'incendio per i diversi target del locale magazzino.

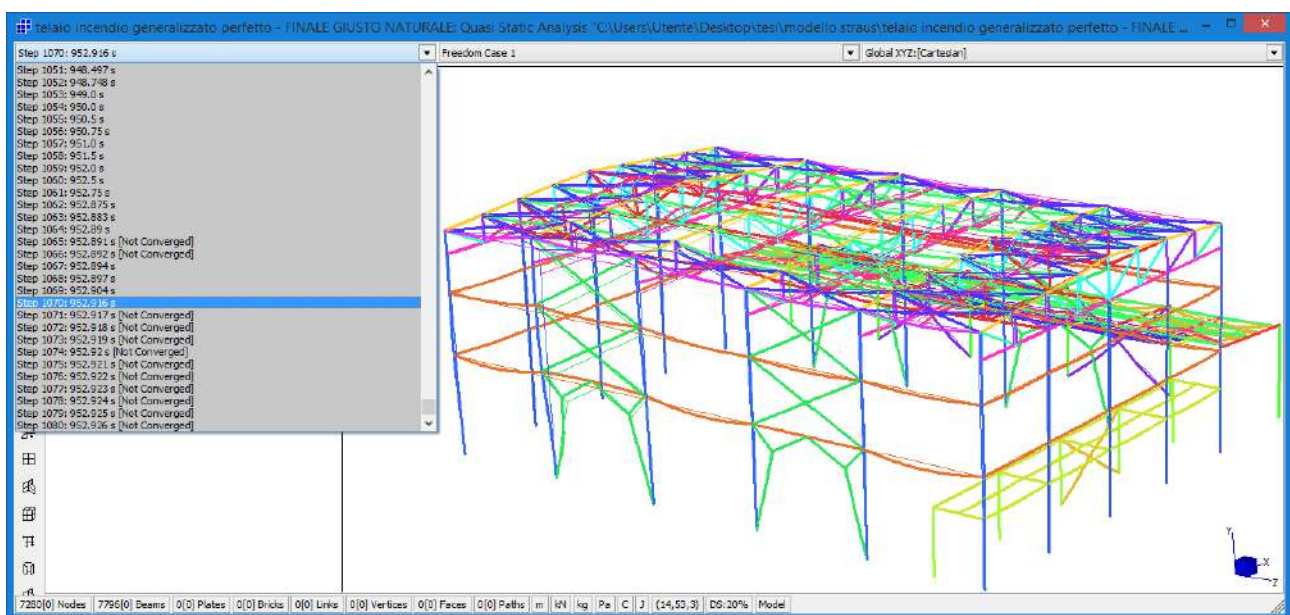


In figura si rappresenta anche il limite di temperatura alla quale la struttura collassa.

Questa rappresenta, secondo gli Eurocodici parte fuoco, già una prima verifica nel dominio delle temperature.

Nelle curve è ben evidente l'effetto dello scoppio delle finestre a nastro e successivamente di apertura dei lucernari con dei decrementi delle temperature, per poi stabilizzarsi e continuare a crescere fino all'esaurimento di tutta l'energia apportata dal combustibile.

Si nota quindi che il limite è raggiunto a 956s ovvero 16 minuti, valore validato anche dalla letteratura.



Risulta quindi evidente che la nostra struttura per poter superare la crisi e rimanere al di sotto della temperatura critica per 30 minuti deve essere interamente protetta con vernici intumescenti.

Naturalmente questa modellizzazione ha spostato il limite temporale da 7 minuti a 16 minuti, giustificando uno spessore di protezione di molto minore rispetto alla prima modellazione con curva ISO834.

Questo naturalmente comporta un notevole risparmio economico vista la grande estensione di carpenteria utilizzata per il fabbricato.

5 PROTEZIONE DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO CON VERNICI INTUMESCENTI

Questi prodotti non posseggono una resistenza al fuoco propria, ma accrescono quella degli elementi strutturali sui quali sono installati. Sarà cura dell'utilizzatore verificare l'aderenza all'impiego del complesso "protettivo con elemento strutturale" basandosi su evidenze sperimentali rese disponibili dal produttore.

Le vernici intumescenti sono dei rivestimenti di protezione reattivi, che mutano lo stato fisico durante il riscaldamento e proteggono in virtù dei parametri termo-fisici dello stato variato, nonché degli effetti di raffreddamento connessi alle reazioni chimiche provocate dal cambiamento di stato.

Le vernici in oggetto hanno la caratteristica di gonfiare grazie ai gas da esse liberati e imprigionati all'interno di una matrice deformabile.



Figura 5.1-Attivazione intumescente

Lo strato carbonioso venutosi a creare, avendo una bassissima densità, costituisce una barriera isolante di alcuni centimetri di spessore, che contribuisce al rallentare del passaggio di calore.

Dette pitture si applicano a spruzzo o con rulli e possono essere applicate in opera o fuori opera con spessori variabili da 200 a 5000 micron. Nel caso di superfici metalliche il piano di posa deve essere accuratamente pulito e trattato con del primer per migliorare l'aderenza della vernice.

5.1 DETERMINAZIONE DELLO SPESSORE DI PROTETTIVO

La vernice intumescente deve garantire una resistenza al fuoco pari a 14 minuti vista l'analisi precedente in cui la temperatura critica si raggiunge circa in 16min.

Il range di temperatura che deve coprire è di circa 280°C.

In questo modo si soddisfa il requisito di resistenza per 30 minuti di incendio naturale.

Noto il rapporto A/V per le diverse sezioni e il tempo di resistenza si determina lo spessore della vernice con le seguenti caratteristiche assunte da letteratura:

- Calore specifico $c=836 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- Densità $\rho=5 \times 10^{-8} \text{ Kg/mm}^3$

Si considera R15 come dai cataloghi dei produttori di vernici intumescenti si individua come spessore da attribuire ai profili un valore di:

- Per profili ad H, I e ILS uno spessore di 500 μm
- Per profili UNP e L uno spessore di 800 μm

Se non si fosse utilizzata la modellazione dell'incendio naturale lo spessore di intumescente sarebbe stato di:

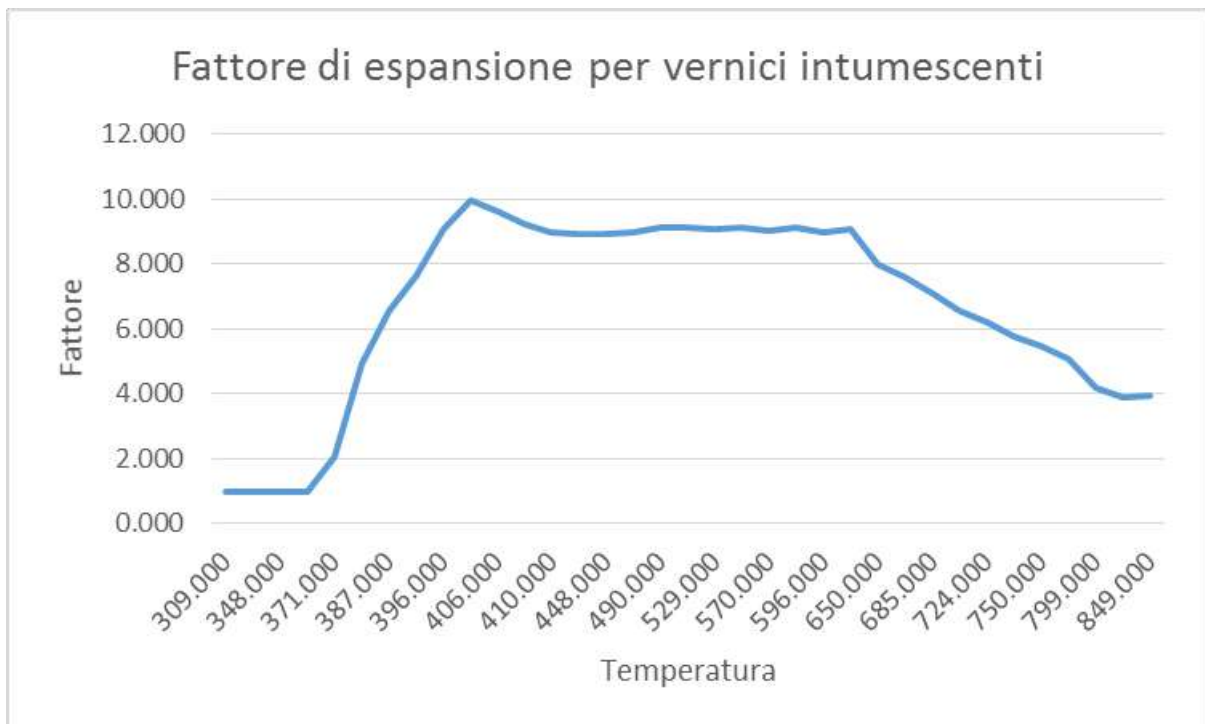
- Per profili ad H, I e ILS uno spessore di 1200 μm
- Per profili UNP e L uno spessore di 1600 μm

Se si fosse utilizzato il livello di prestazione III la struttura avrebbe dovuto resistere per un tempo pari a 240 minuti quindi lo strato di vernice intumescente sarebbe stato pari a:

- Per profili ad H, I e ILS uno spessore di 2400 μm
- Per profili UNP e L uno spessore di 2800 μm

Si esegue una verifica con Straus7, sui profili a L maggiormente soggetti alle variazioni termiche, per confermare che questi spessori sono sufficienti nei due casi. Nella modellazione si tiene conto dell'attivazione dell'intumescente alla temperatura di

370°C che considerando la curva ISO834 risulta già dopo 20s mentre con la curva naturale d'incendio si arriva a 9 minuti.

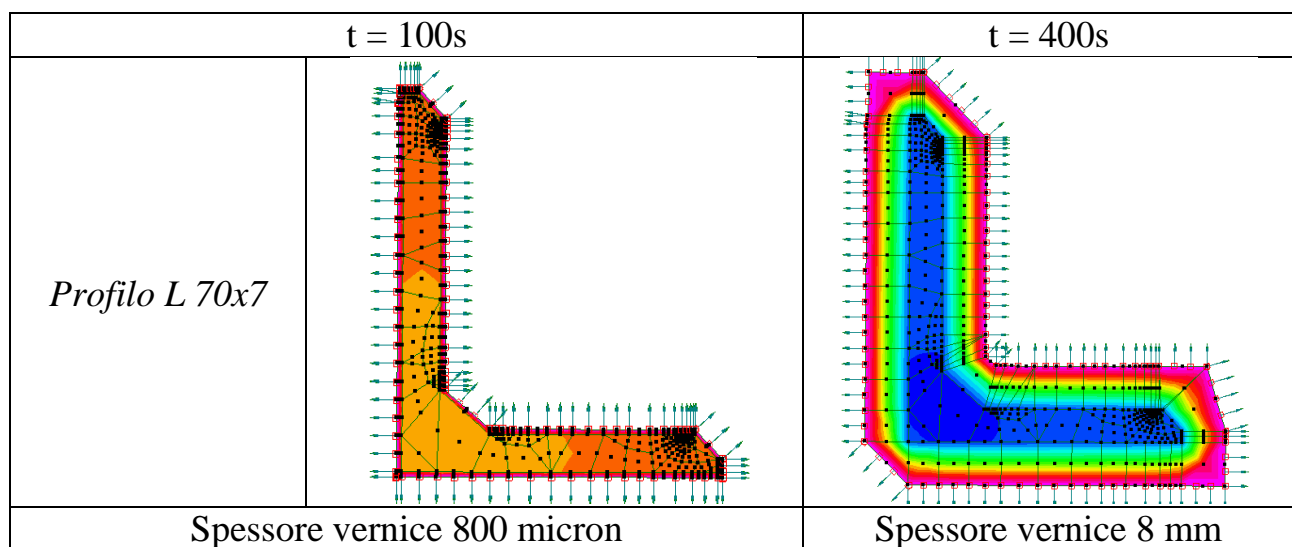


In letteratura si ricava che per uno strato compreso tra i 500 e 800 micron il fattore di espansione è pari in media a 10 volte lo spessore iniziale.

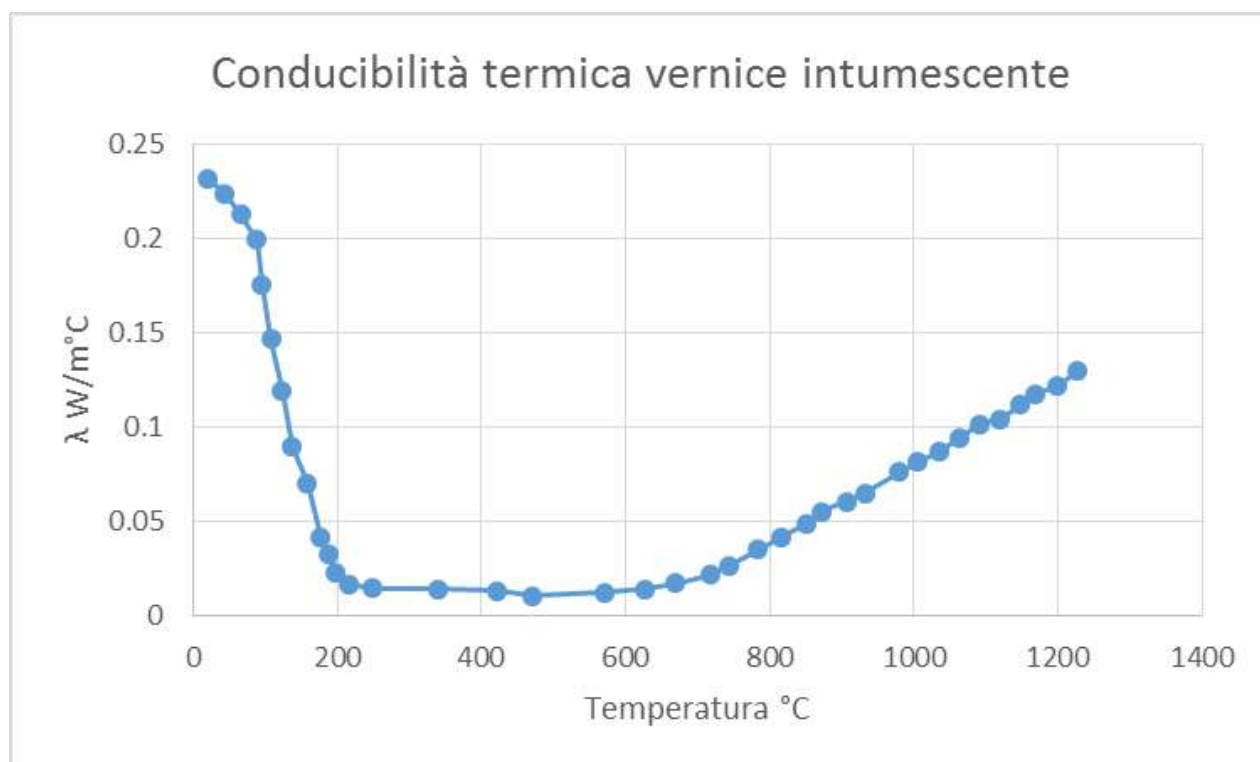
Da recenti studi si nota che se si modella l'elemento usando una curva ISO834 sin da subito si considera l'espansione della vernice.

Nel nostro caso si procede per via iterativa in modo da considerare i giusti tempi in cui avviene l'attivazione dell'intumescente.

Considerando il profilo ad L avremo per il caso di curva naturale SF:



L'andamento della conduttività termica della vernice in funzione della temperatura rispecchia i fenomeni che intervengono durante la fase della intumescenza e che sono stati illustrati. Dal valore originario di 0.25 W/m°C (a temperatura ambiente) si ha una brusca diminuzione fino al valore minimo di 0.012 che si raggiunge a circa 250°C. Tale valore minimo rimane praticamente costante fino ad una temperatura di circa 600 °C, al di sopra della quale si ha un incremento pressoché' lineare di conduttività che raggiunge il valore di 0.12 a circa 1100°C.



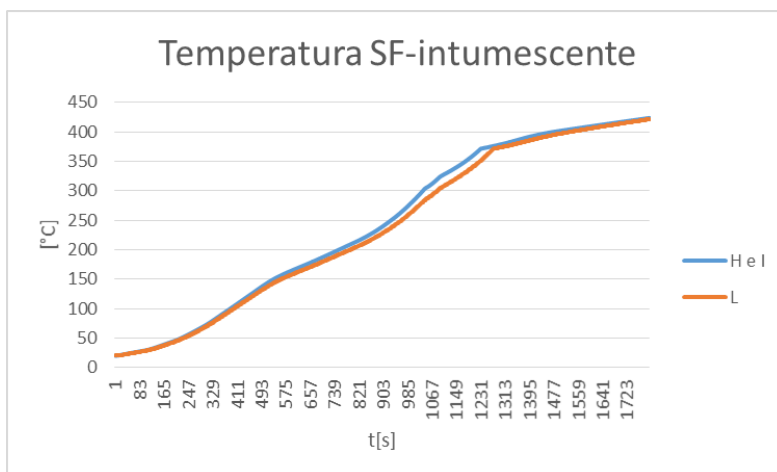
5.2 DETERMINAZIONE DELLA CURVA NATURALE DI PROGETTO CON PROTETTIVO

Di seguito si modellano su Straus7 i diversi profili appartenenti alla struttura con vernice intumescente e viene applicato come carico termico, sui quattro lati, la curva naturale d'incendio, individuando la curva naturale d'incendio di progetto dei diversi elementi.

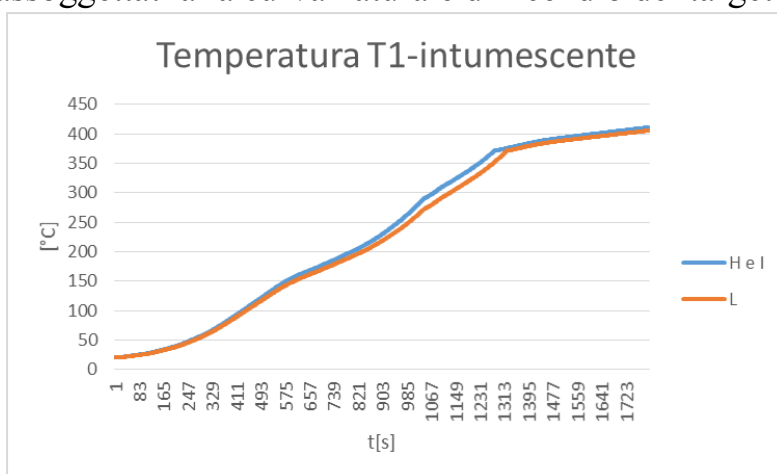
In particolare si analizzano le membrature sottoposte alle 4 curve precedentemente individuate in modo da poter trovare la distribuzione di temperatura sull'edificio.

Si nota un repentino cambiamento di direzione, nel momento in cui avviene l'attivazione dell'intumescente.

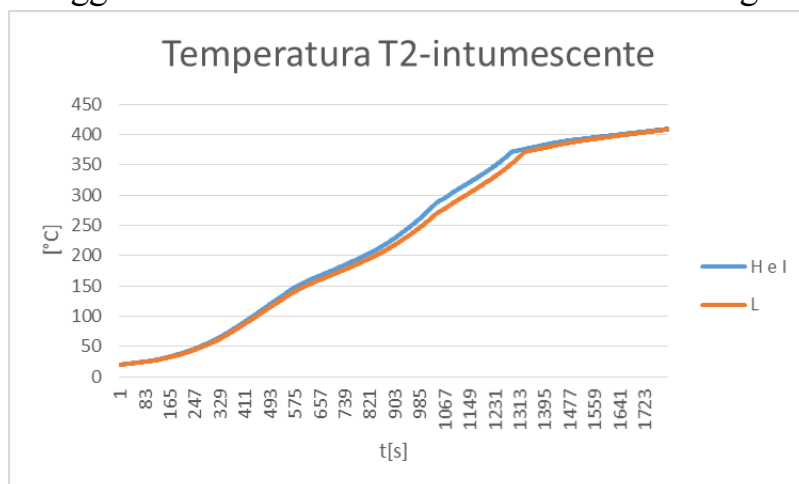
1. Elementi assoggettati alla curva naturale d'incendio del target SF



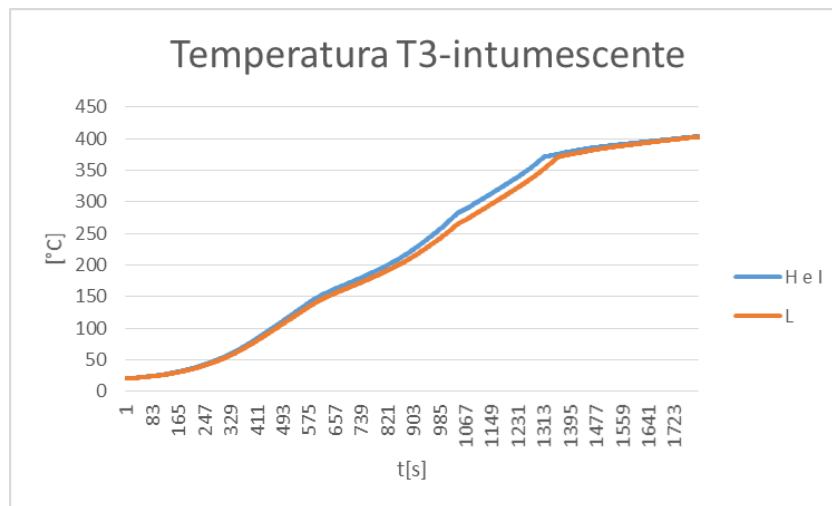
2. Elementi assoggettati alla curva naturale d'incendio del target T1



3. Elementi assoggettati alla curva naturale d'incendio del target T2



4. Elementi assoggettati alla curva naturale d'incendio del target T3



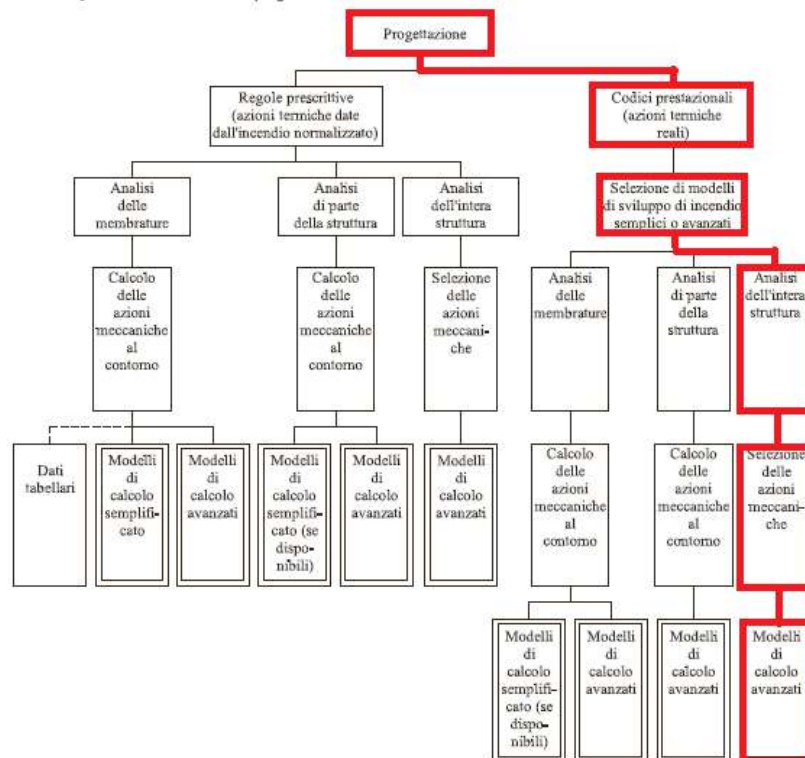
Considerando i seguenti spessori, e un costo di circa 10-15€ al kg/m², si individua grazie alla modellazione, un risparmio economica di 2/3 nella stesura della vernice, rispetto alla modellazione non avanzata.

Spessore film (micron)	Q.tà al mq	Spessore film (micron)	Q.tà al mq
900	1,500	2600	4,500
750	1,300	2400	4,200
		2250	3,900
		2100	3,600
		1950	3,400
		1800	3,100
		1650	2,800
		1500	2,800
		1350	2,300
		1200	2,100
		1050	1,800
400	0,700	900	1,600
		750	1,300

- Per uno spessore di 800µm si ha una quantità di 1.4 kg/m² invece di 2.8kg/ m² per uno spessore di 1600 µm;
- Per uno spessore di 500µm si ha una quantità di 0.9 kg/m² invece di 2.1kg/ m² per uno spessore di 1200 µm;

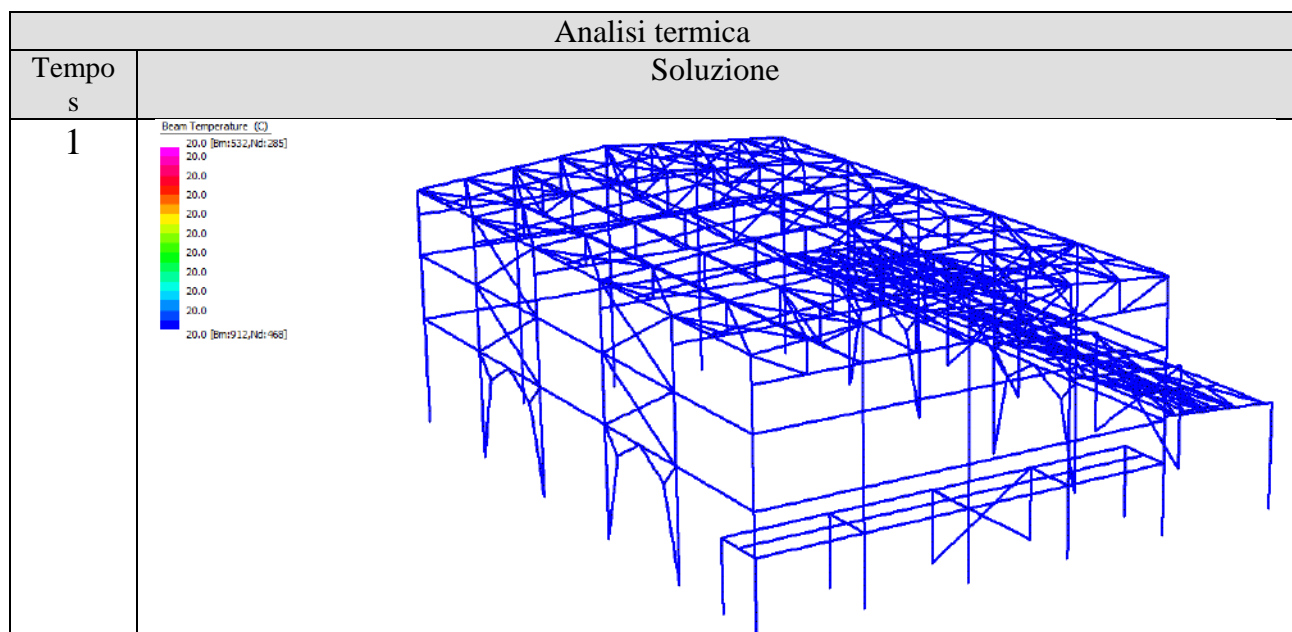
Nel livello di prestazione III gli spessori avrebbero comportato un utilizzo di circa 4.5kg/m² per spessori di 2600micron mentre l'utilizzo di 5kg/m² per spessori di 2800micron.

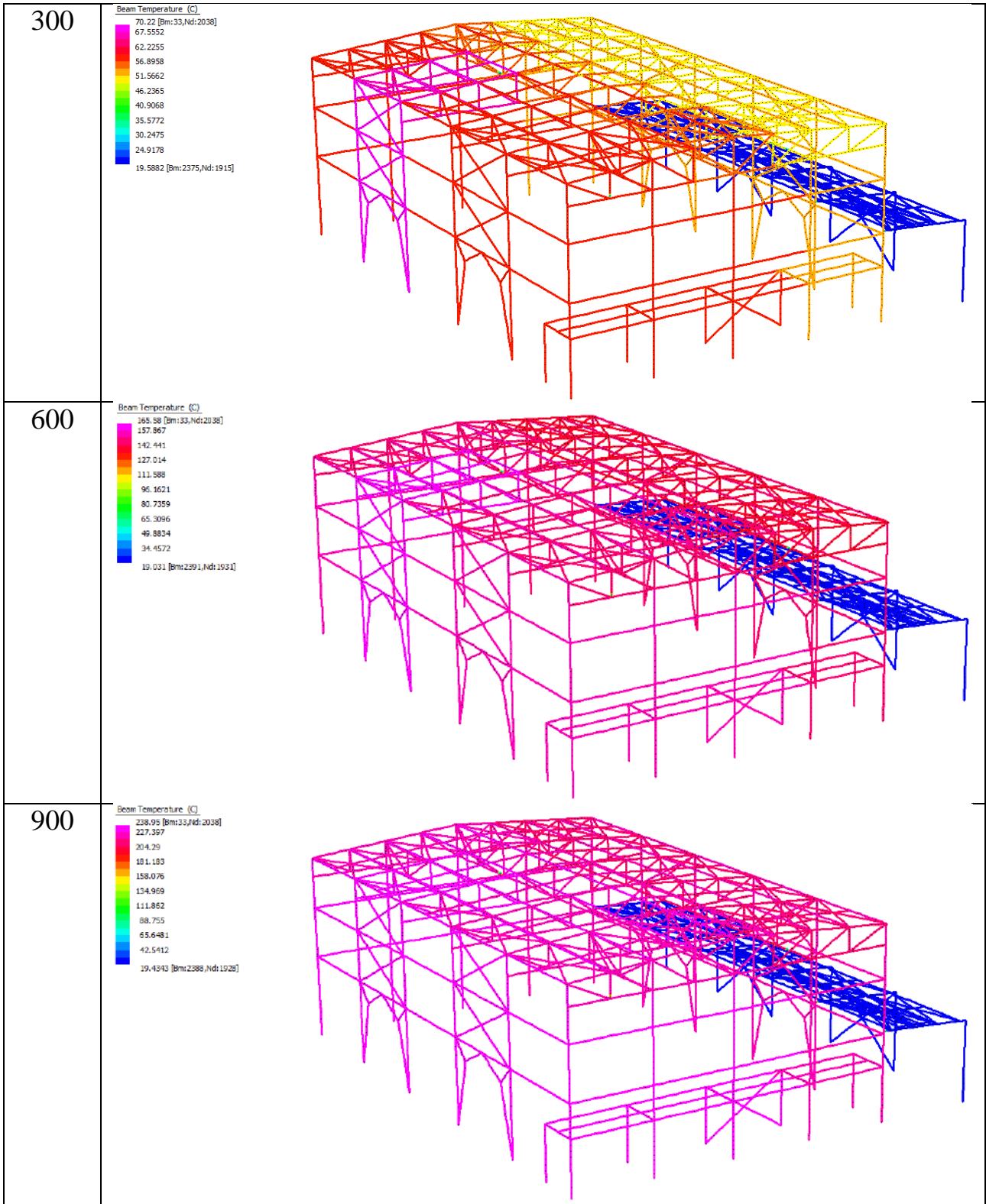
6 APPLICAZIONE DELLE CURVE NATURALI AL MODELLO PRETETTO

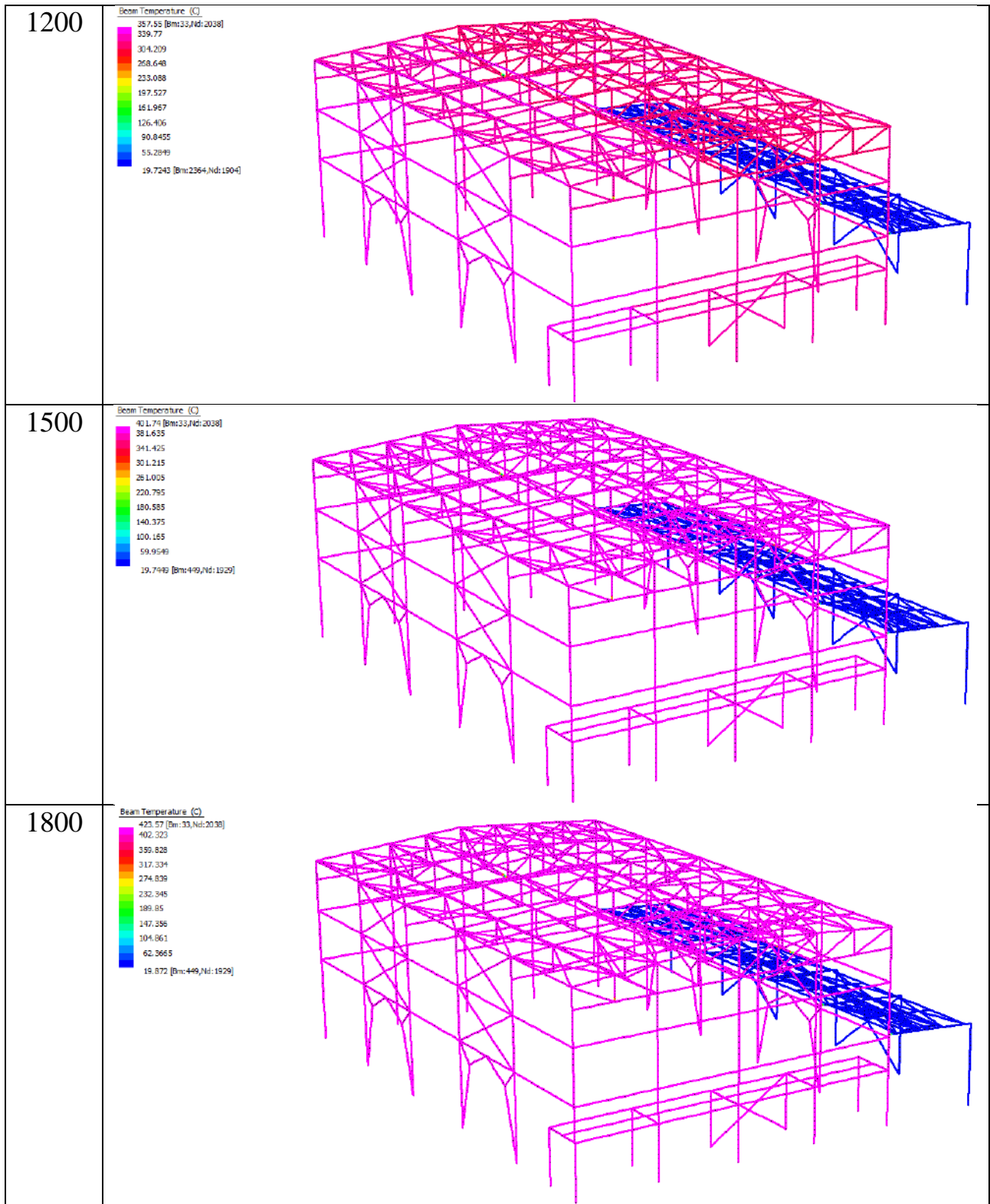


Di seguito si applicano le curve termiche precedentemente valutate, con il protettivo, al modello di calcolo.

Si esegue un'analisi termica transiente non lineare.



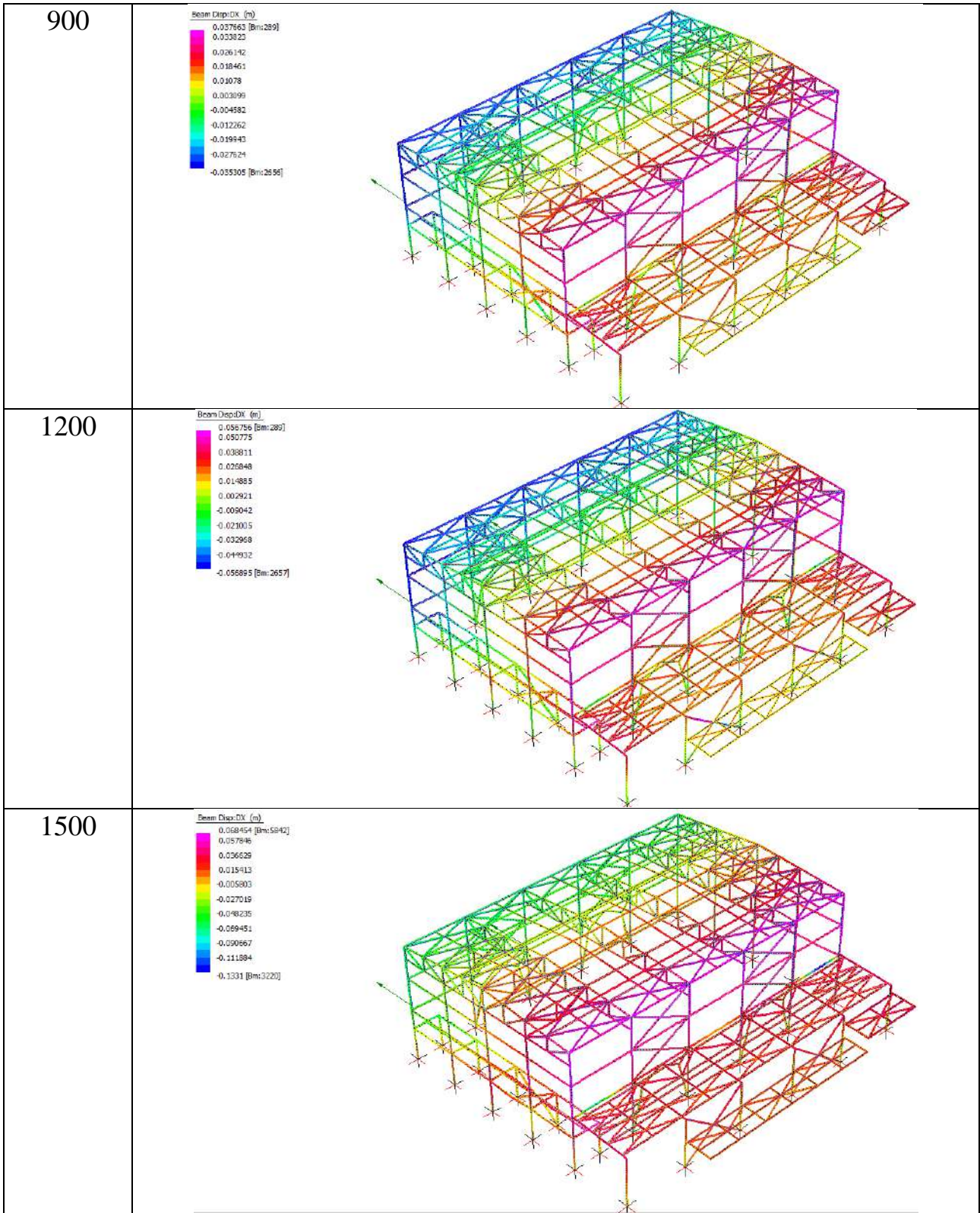


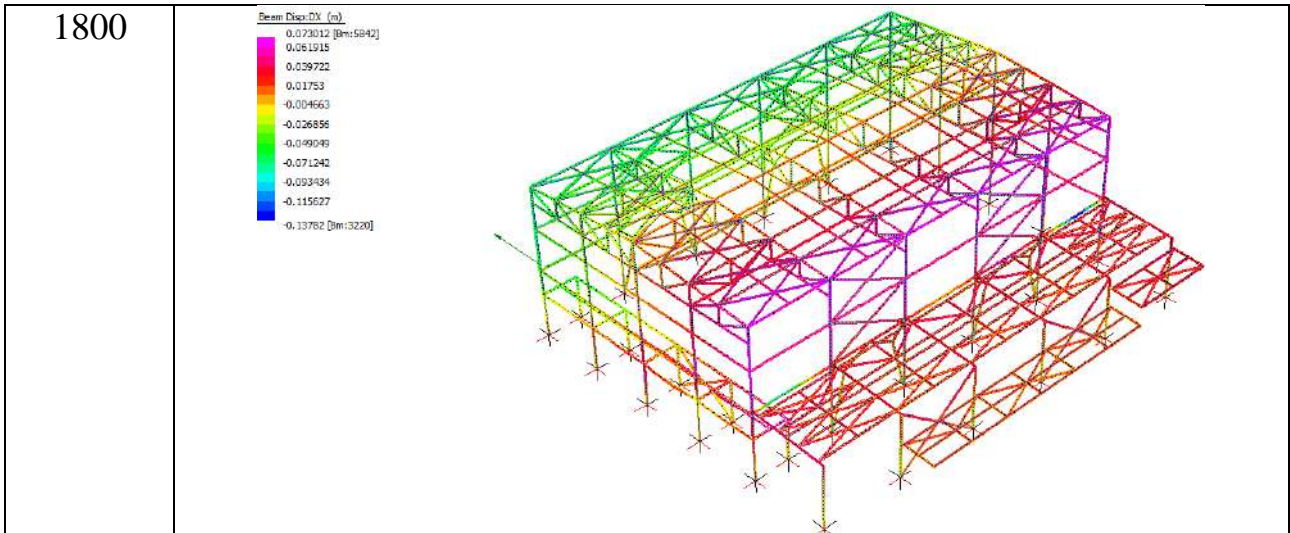


Si procede con l'analisi meccanica.

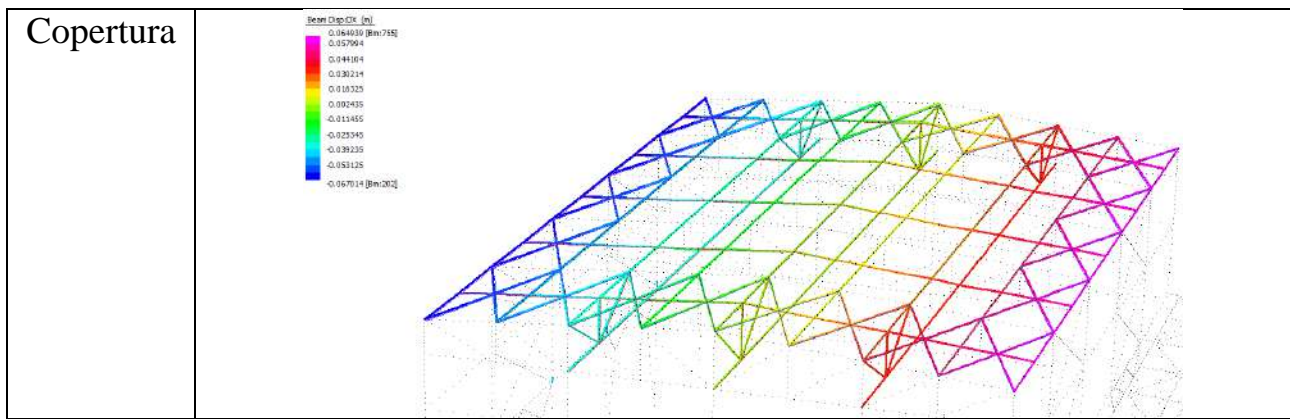
Analisi meccanica

Tempo s	Soluzione
1	<p>Beam Disp: DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.11533 [Im:5915] 0.10963 0.00922 0.007081 0.00514 0.003199 0.001258 -0.000682 -0.002624 -0.004565 -0.006506 [Im:5802]
300	<p>Beam Disp: DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.114943 [Im:3266] 0.11294 0.009990 0.006701 0.003404 0.000108 -0.003189 -0.006486 -0.009783 -0.113075 [Im:5802]
600	<p>Beam Disp: DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.025748 [Im:3266] 0.023238 0.01822 0.013201 0.008182 0.003163 -0.001856 -0.006875 -0.011894 -0.016912 [Im:5836]





Particolari a 1800s in direzione X	
Gruppo	Soluzione
Capriate	<p>Beam Disp:DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.06532 [Bm:82] 0.05285 0.044215 0.030145 0.016075 0.002005 -0.012064 -0.026134 -0.040204 -0.054274 -0.068344 [Bm:436.1]
Pilastrì	<p>Beam Disp:DX (m)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.065365 [Bm:2536] 0.054671 0.033283 0.011895 -0.009493 -0.030881 -0.052269 -0.073656 -0.095044 -0.116432 -0.13782 [Bm:3220]



7 VERIFICHE

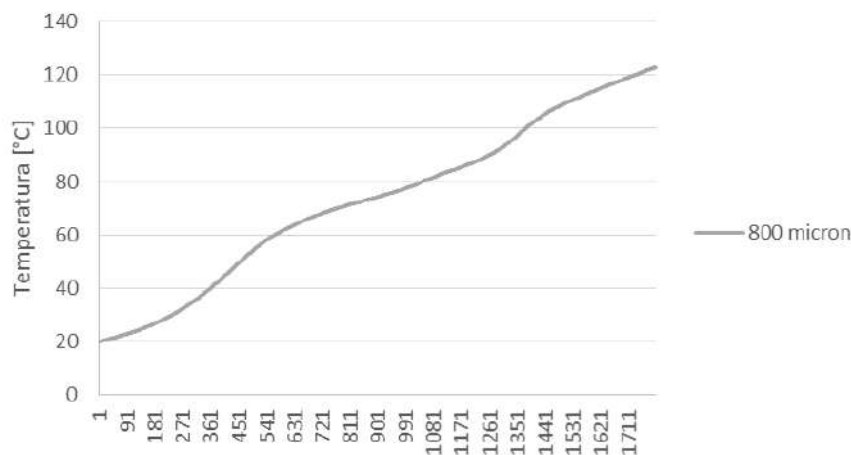
7.1 COLLASSO IMPLOSIVO

Visto l'andamento delle temperature dovuto allo scenario 2.1 con struttura imperfetta, è da notare sia che gli spostamenti dei pilastri dovuti all'espansione della capriata sono maggiori nella direzione della struttura da proteggere, sia che la sottostruttura del locale collettame si trova ad una temperatura inferiore ai 250°C.

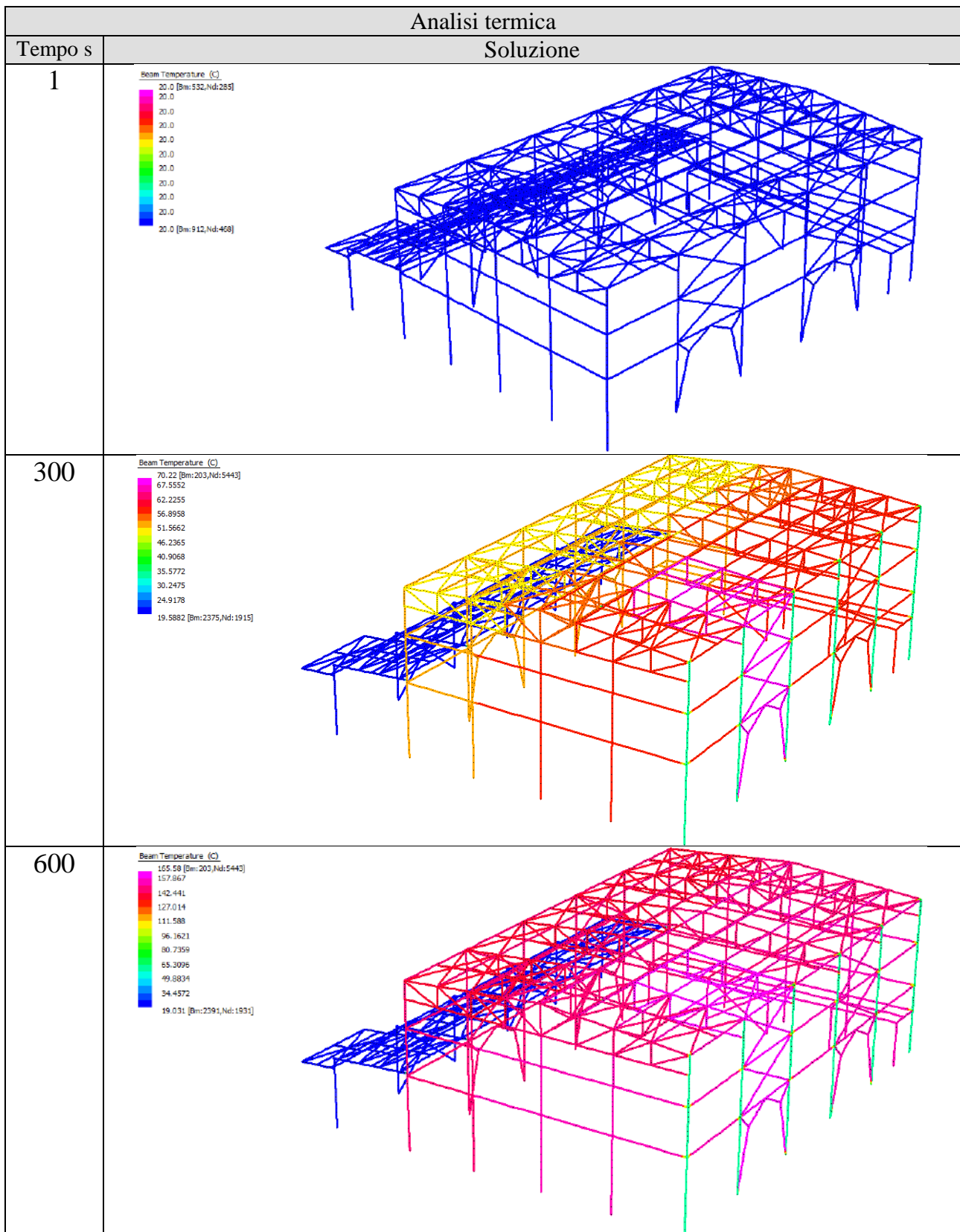
Le strutture del locale collettame hanno una resistenza maggiore rispetto alla restante struttura visto che non subiscono il degrado delle caratteristiche meccaniche dovuto alle alte temperature.

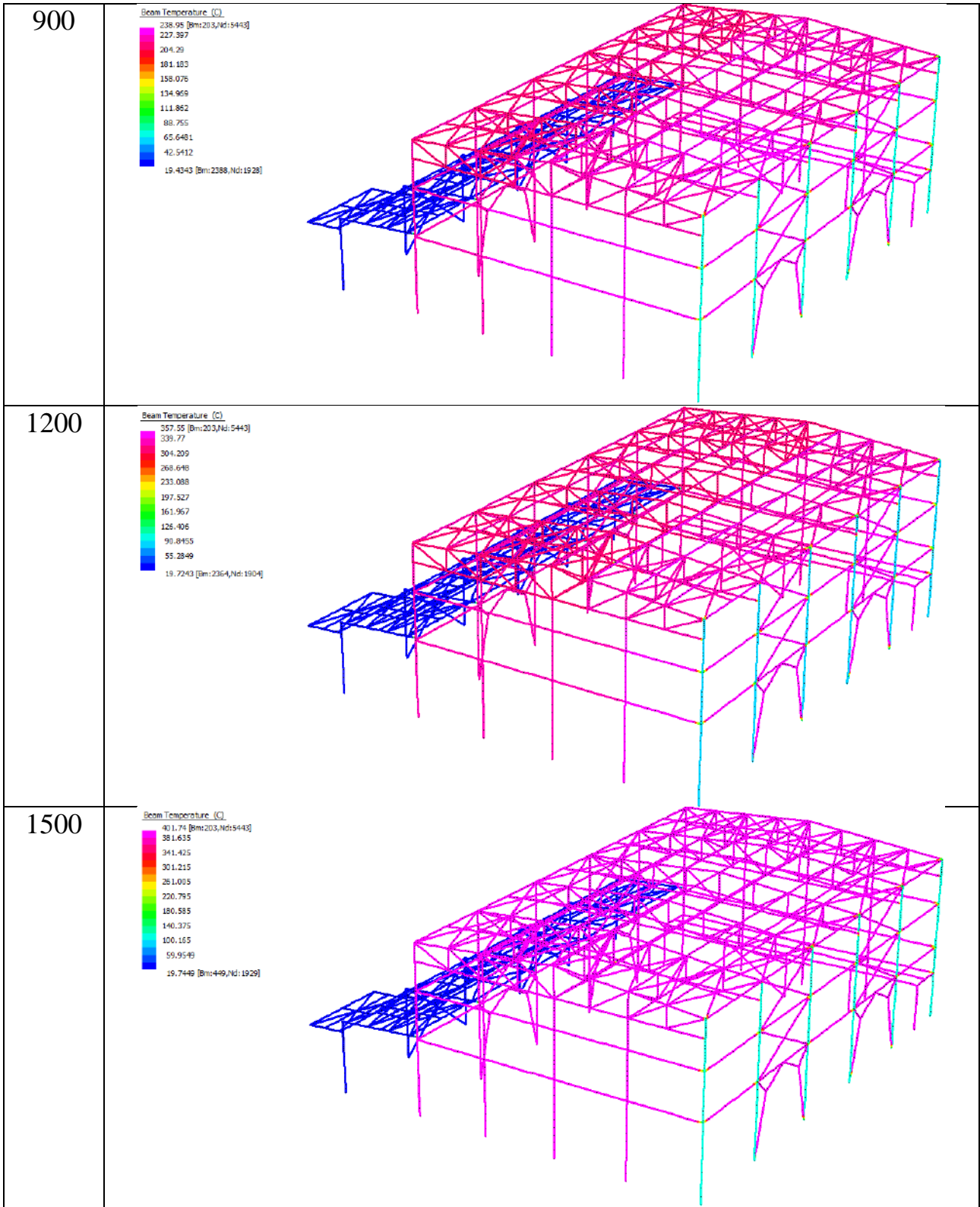
Questo porta a un incremento degli spostamenti verso l'esterno della struttura in direzione del fabbricato già esistente.

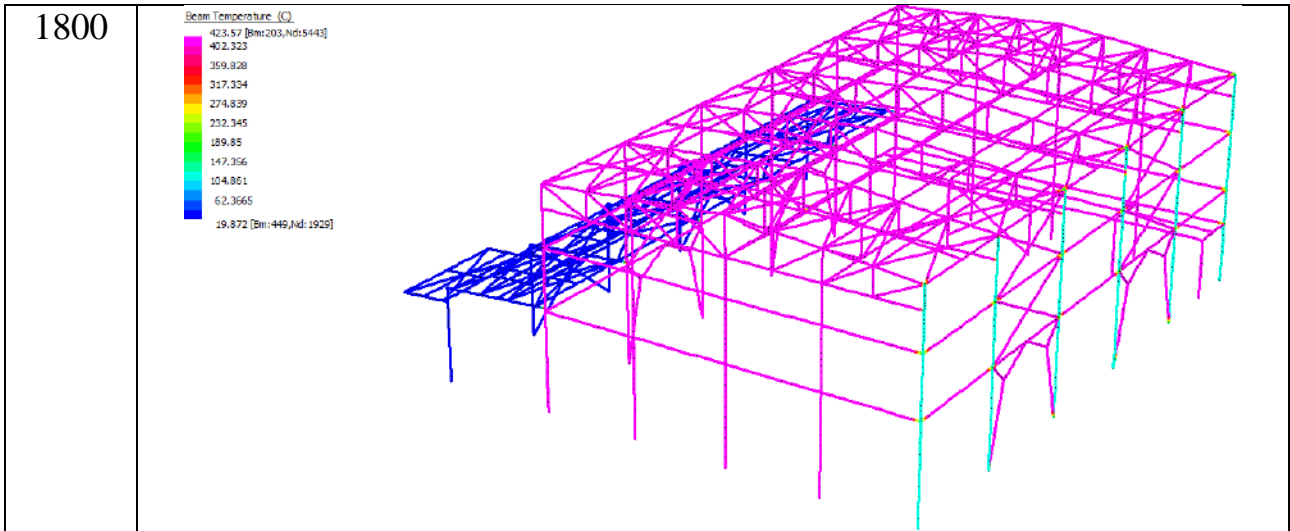
A tal proposito per garantire il collasso implosivo si proteggono i pilastri adiacenti al fabbricato da proteggere con uno spessore di intumescente maggiore pari a 800 micron. In questo modo le temperature saranno inferiori se si garantirà un minore decremento di resistenza rispetto al resto della struttura.



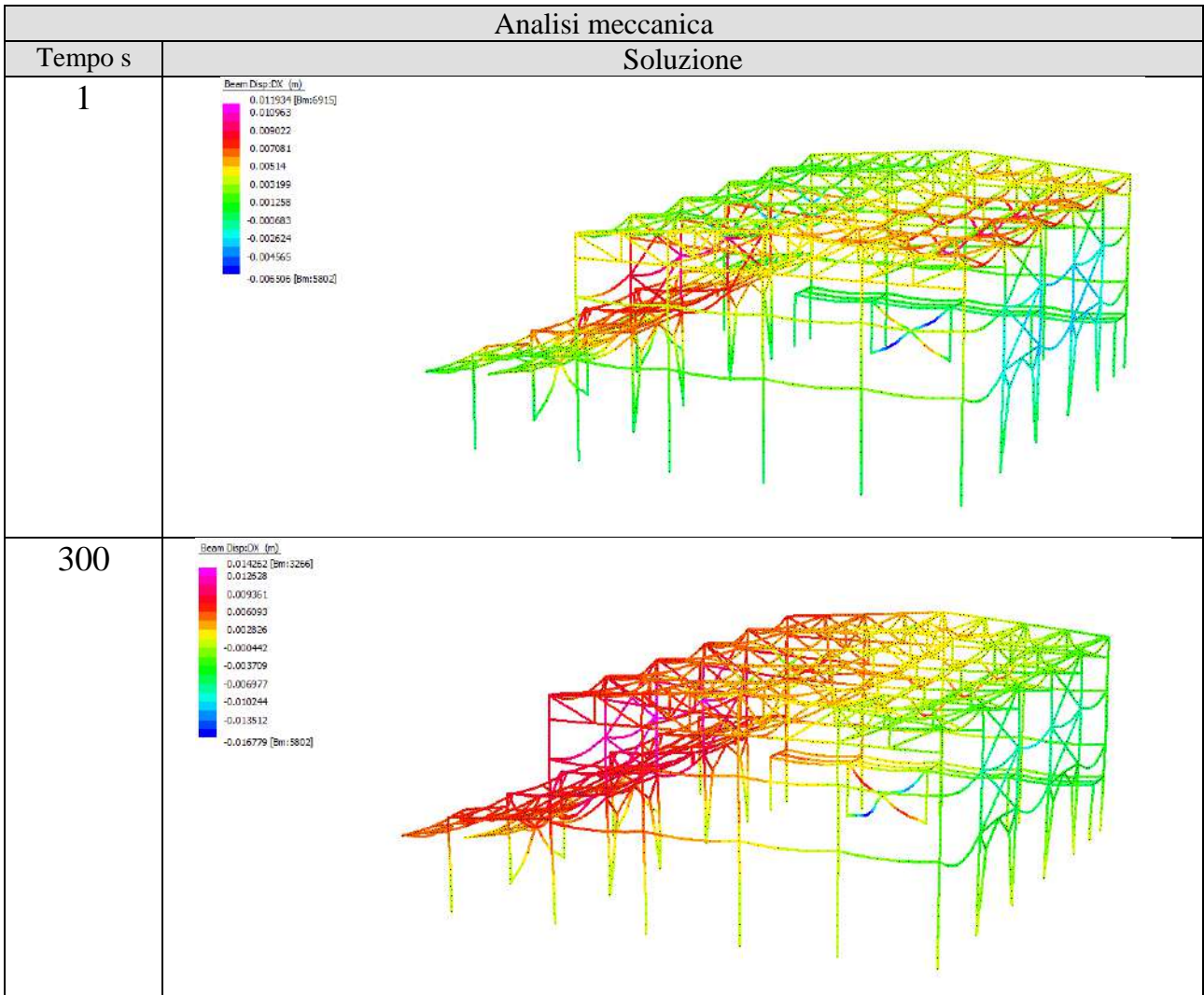
Di seguito si esegue l'analisi termica transiente non lineare.

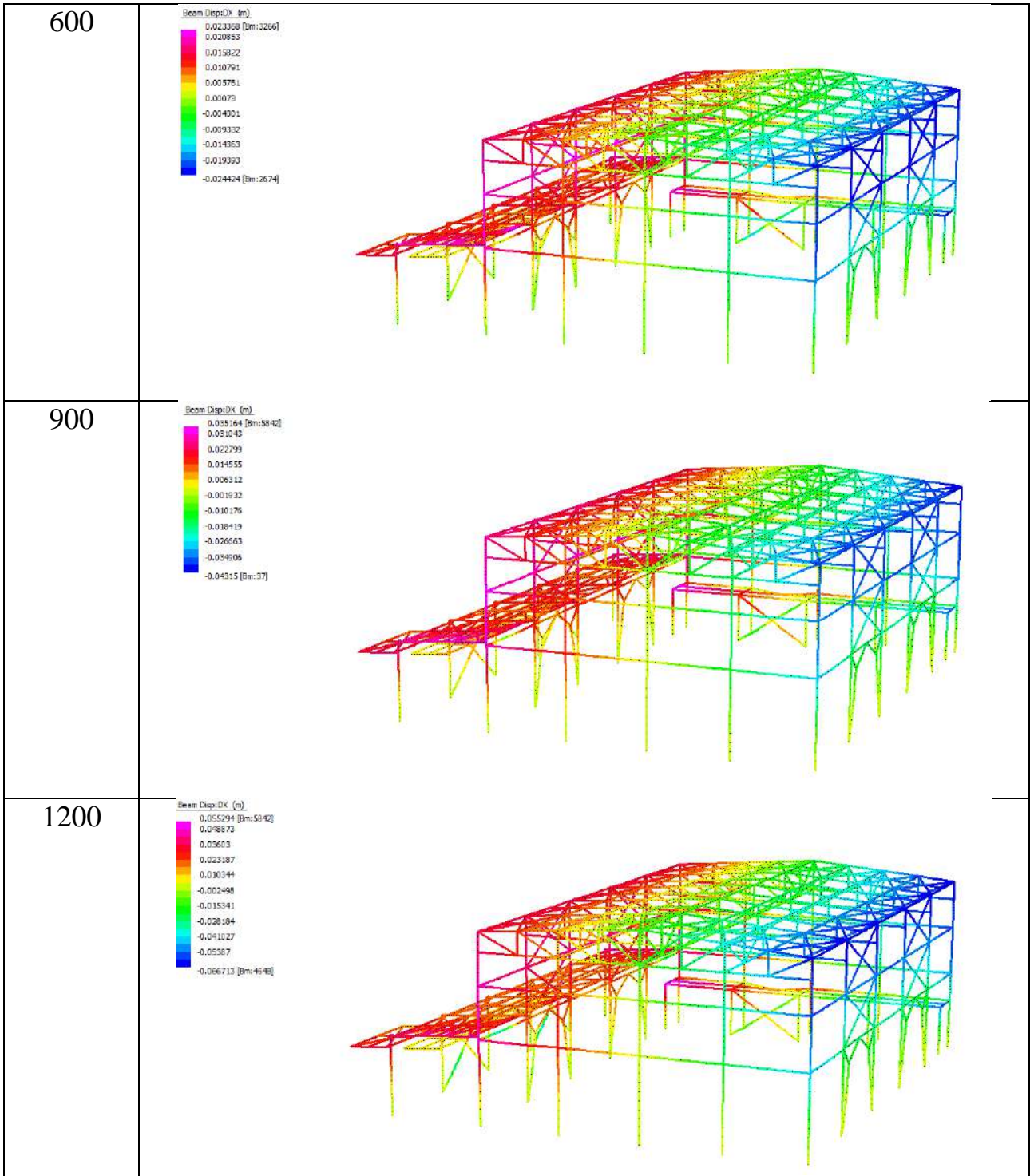


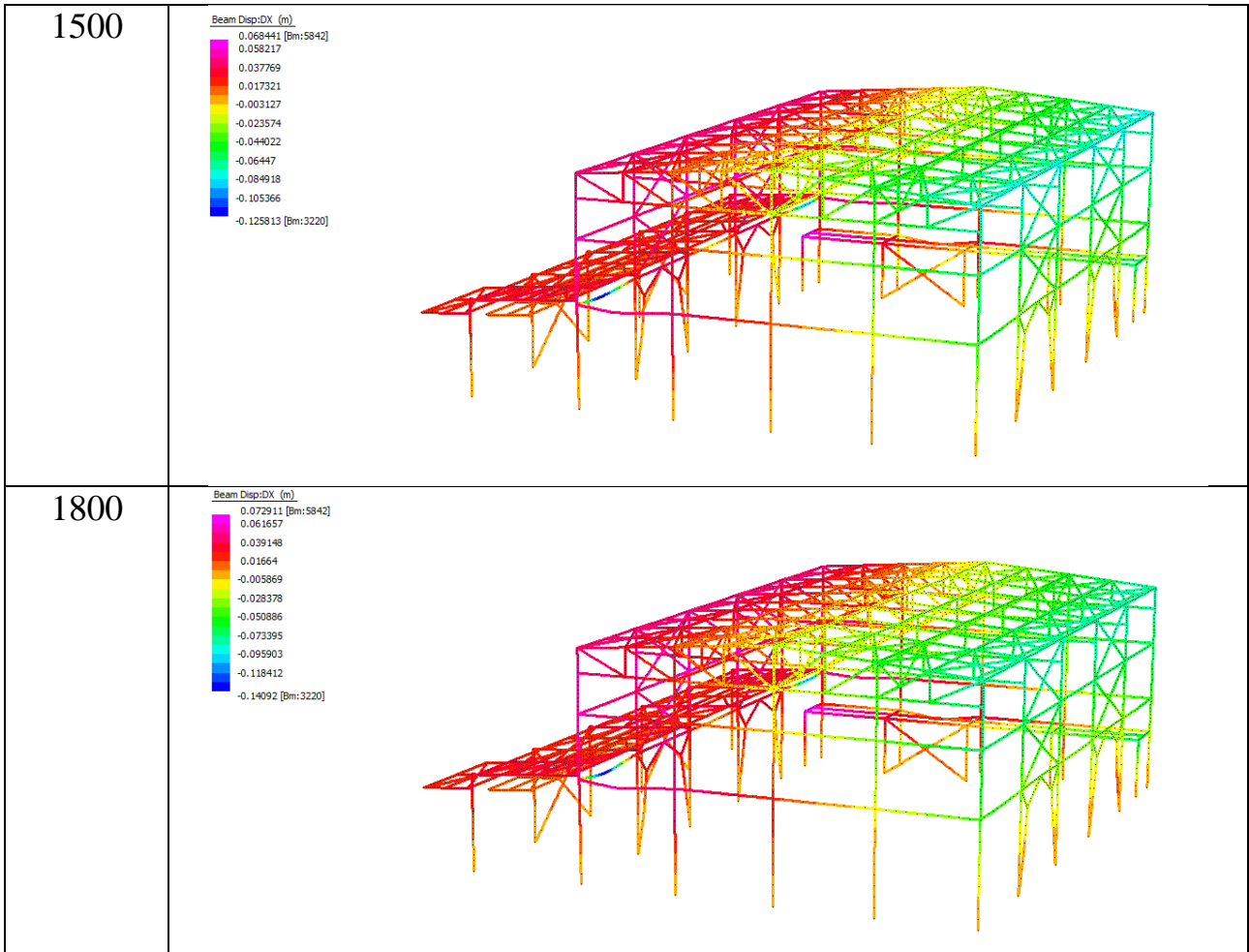




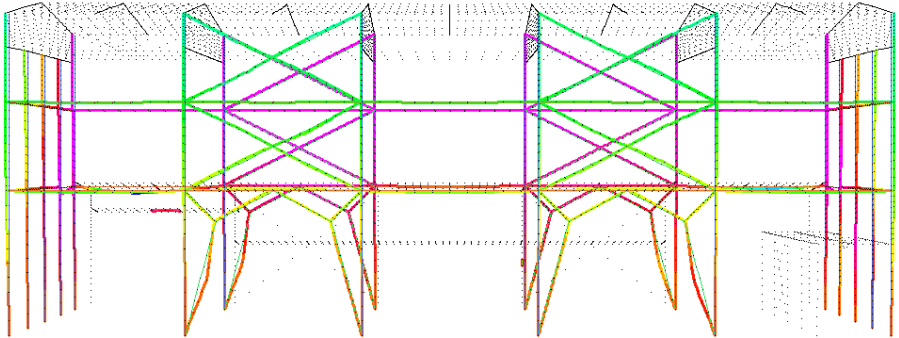
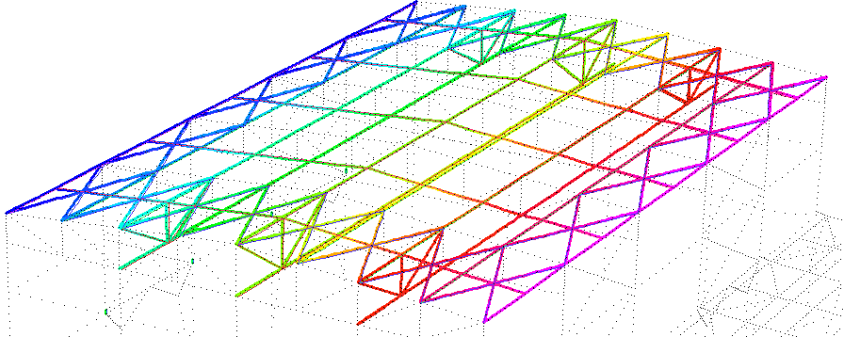
Si procede con l'analisi meccanica.





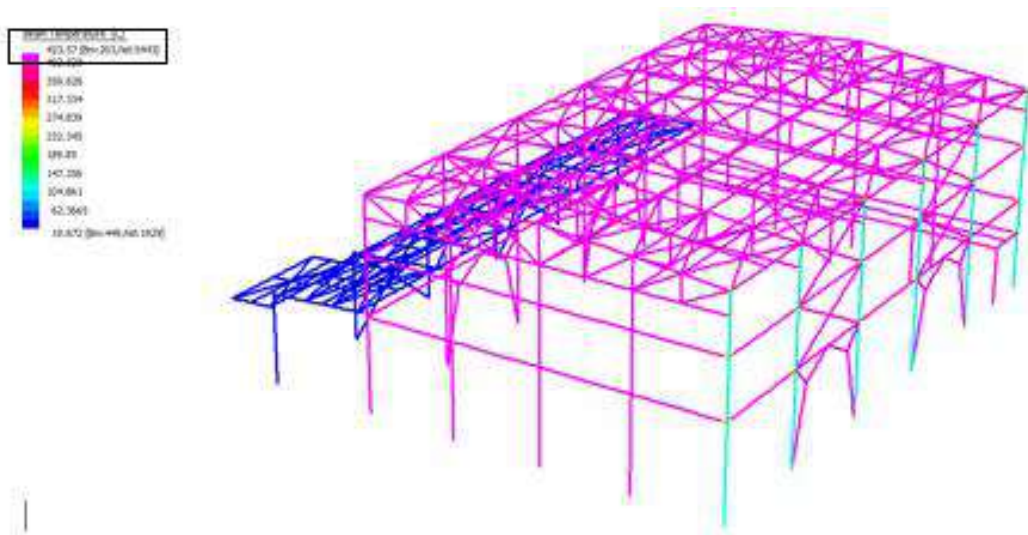


Particolari a 1800s in direzione X	
Gruppo	Soluzione
Capriate	

Pilastrri	
Copertura	

7.2 VERIFICA NEL DOMINIO DELLE TEMPERATURE

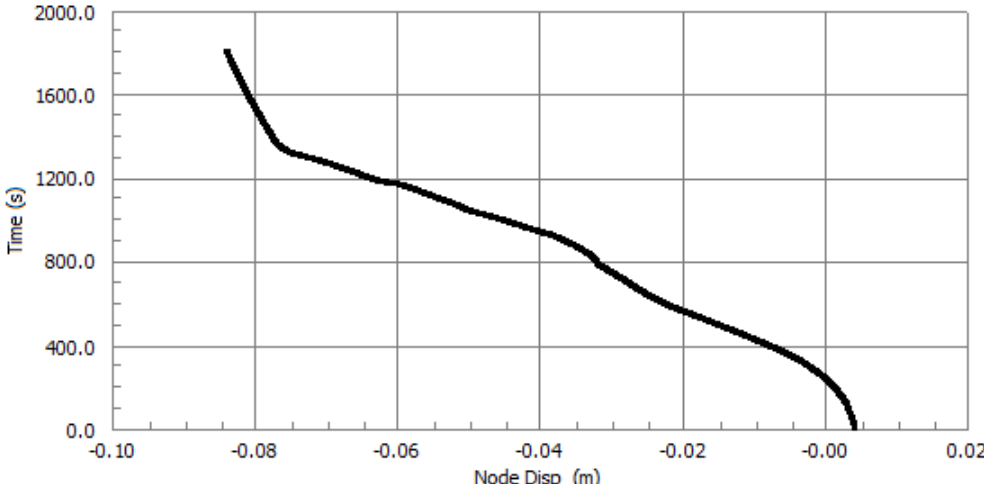
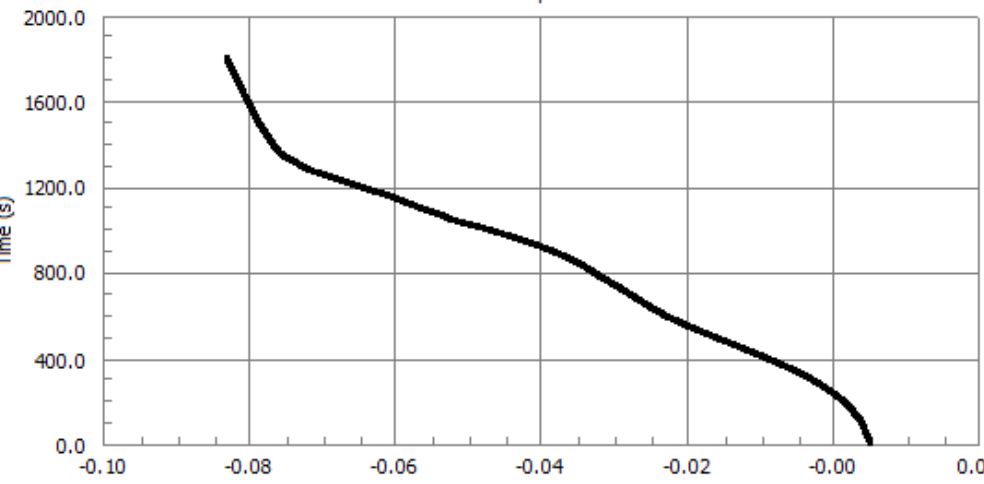
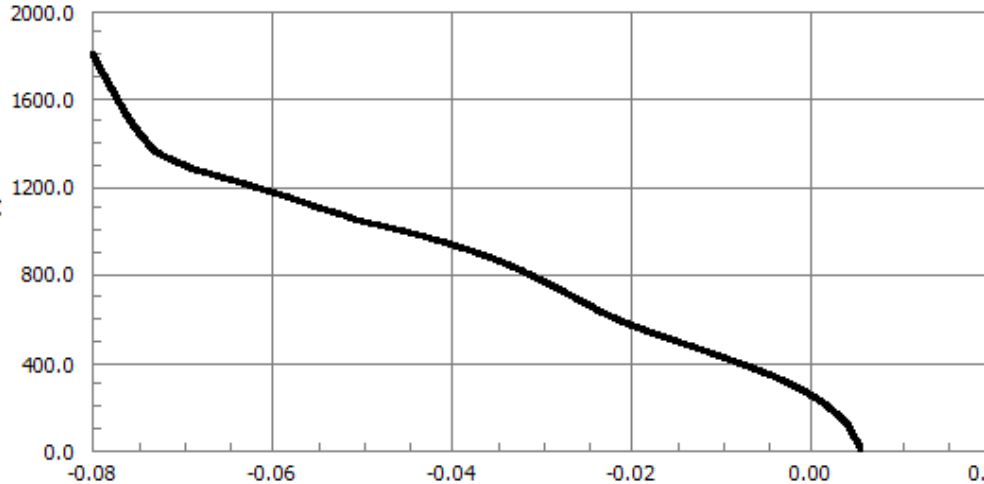
Si verifica agevolmente che le temperature nella struttura protetta con vernice intumescente sono al massimo pari a 423°C, quindi al di sotto di quella critica di 570°C.



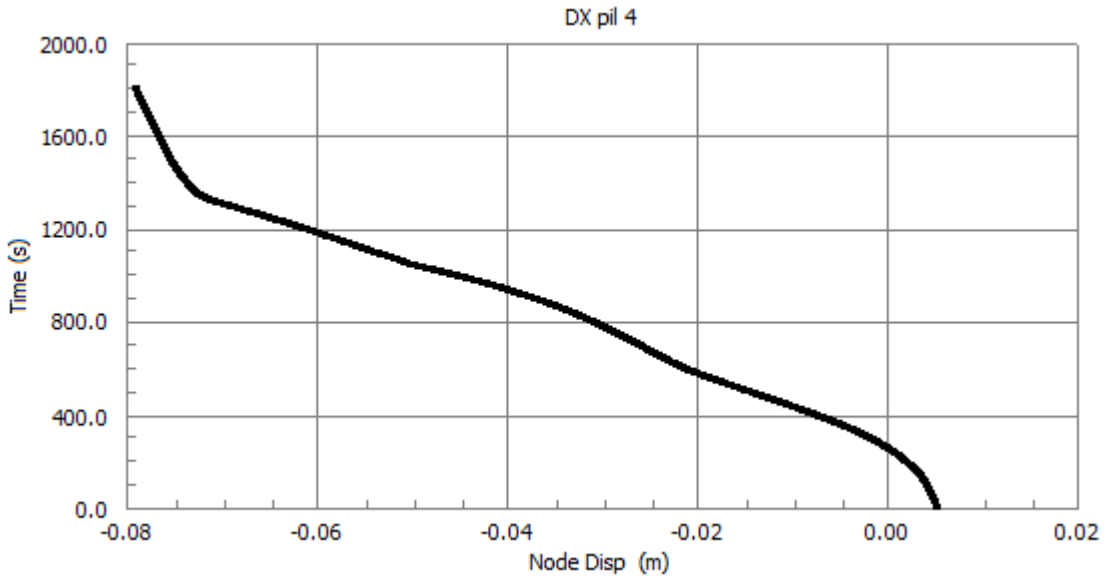
7.3 VERIFICA NEL DOMINIO DEL TEMPO

Anche in questa circostanza si nota che la struttura resiste per un tempo congruo con quello individuato in fase di progettazione pari a 30 minuti incendio naturale.

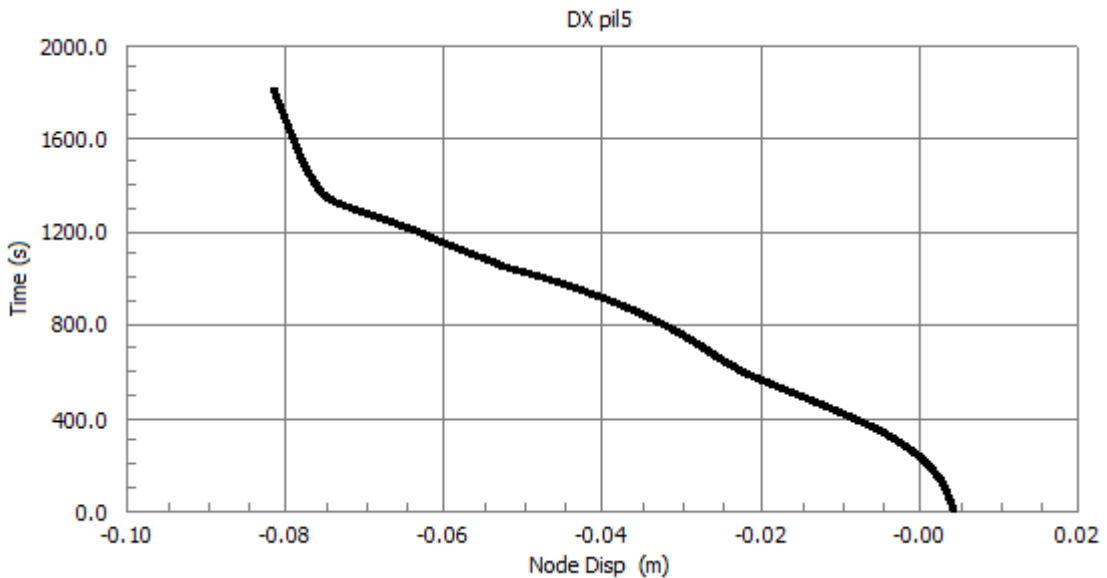
Punti di controllo spostamenti lungo l'asse X

Nodo	Grafico
1	<p style="text-align: center;">DX pil 1</p> 
2	<p style="text-align: center;">DX pil 2</p> 
3	<p style="text-align: center;">DX pil 3</p> 

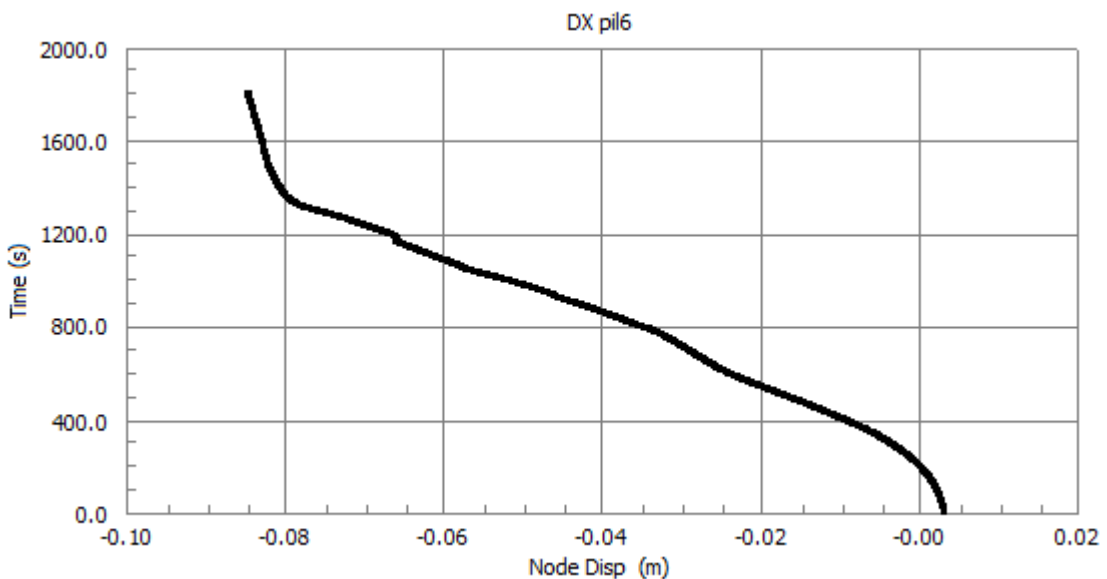
4



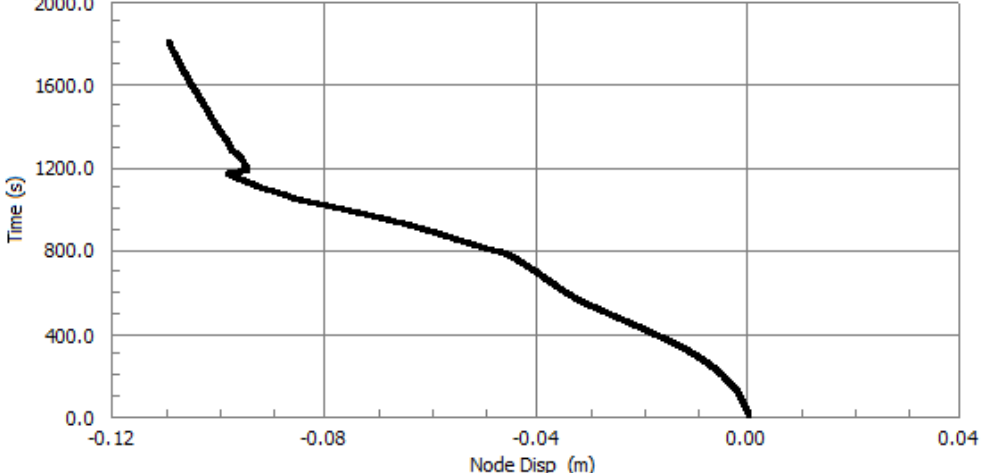
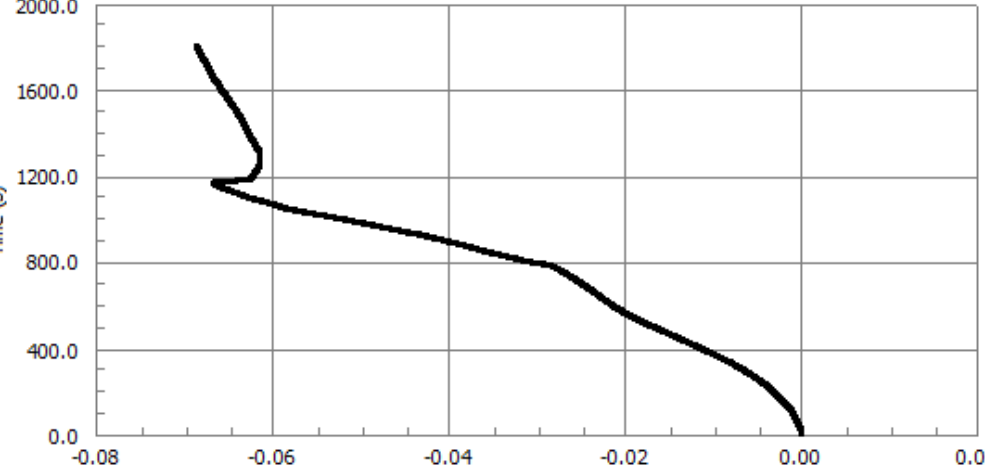
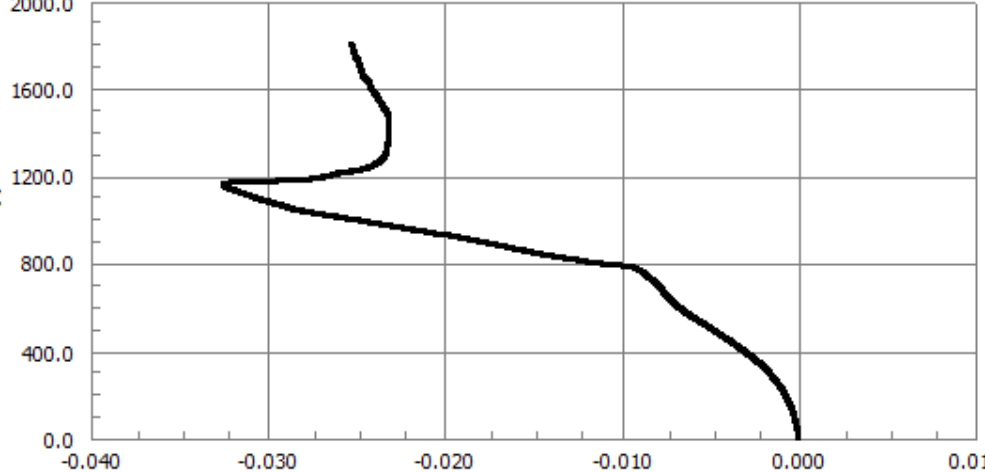
5



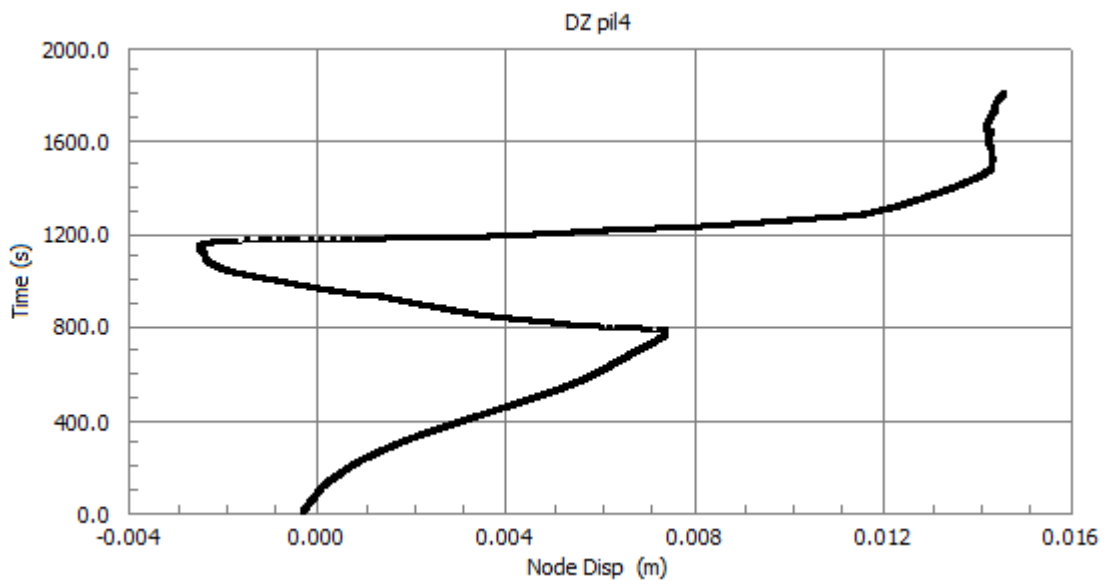
6



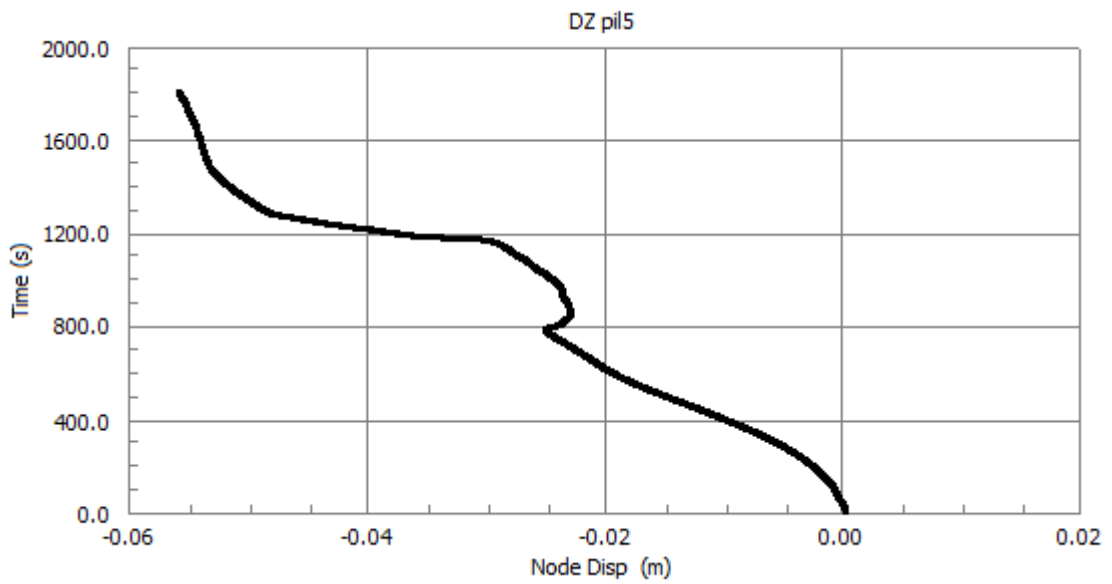
Punti di controllo spostamenti lungo l'asse Z

Nodo	Grafico
7	<p style="text-align: center;">DZ pil1</p> 
8	<p style="text-align: center;">DZ pil2</p> 
9	<p style="text-align: center;">DZ pil3</p> 

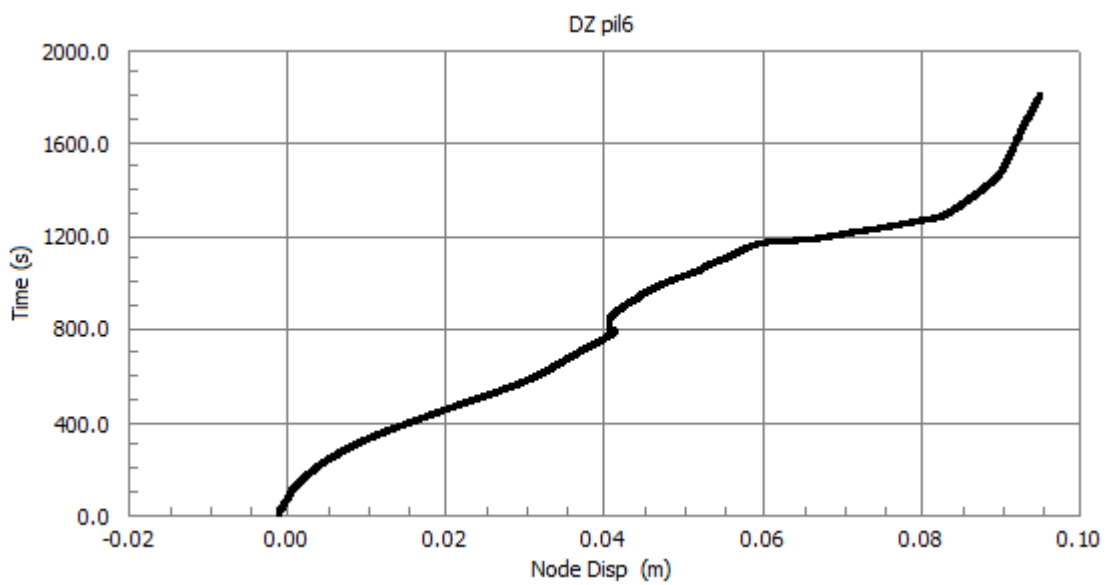
10



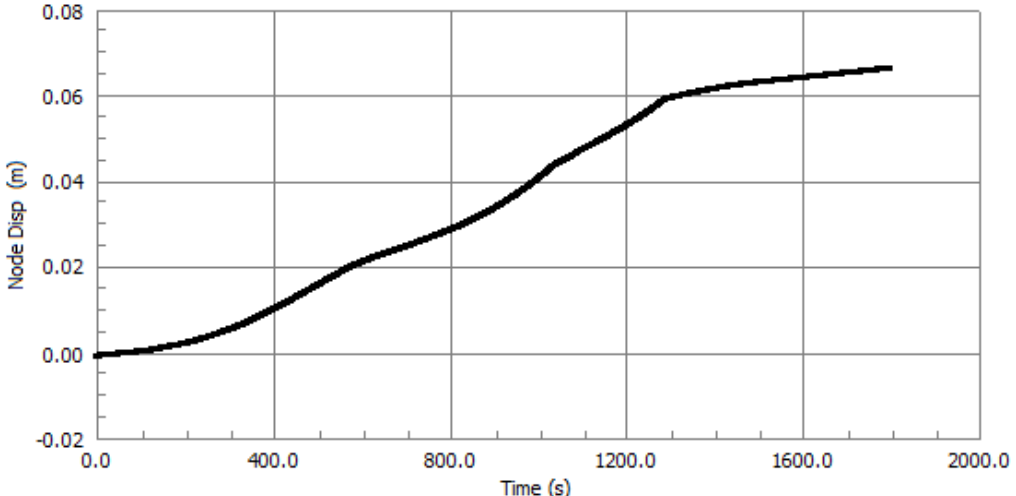
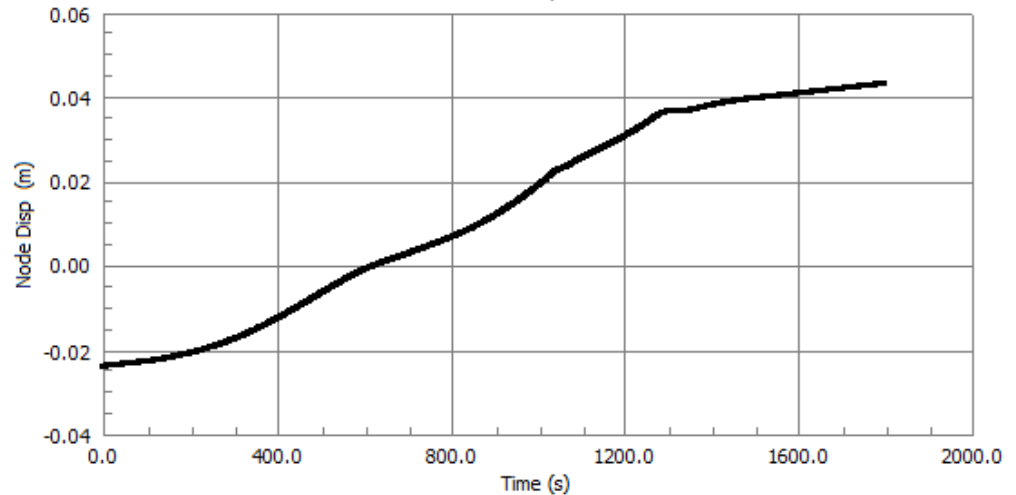
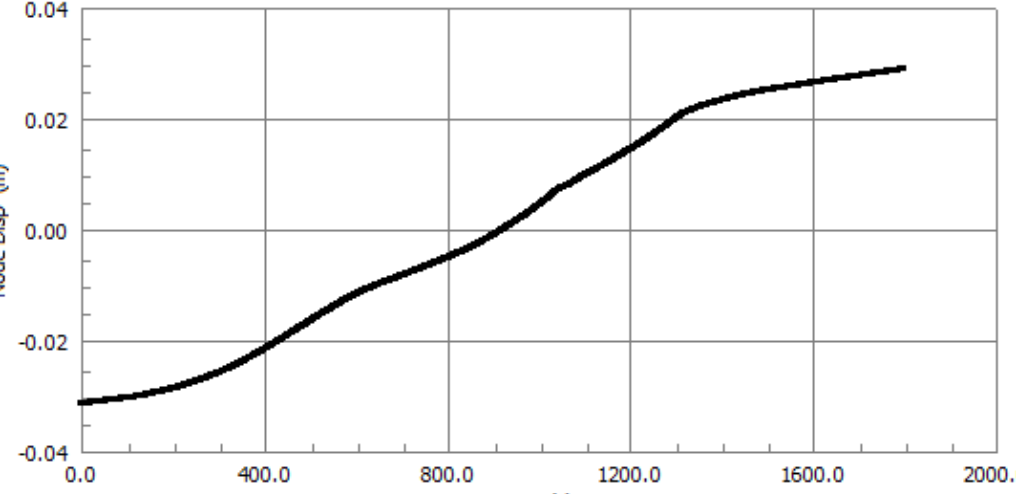
11



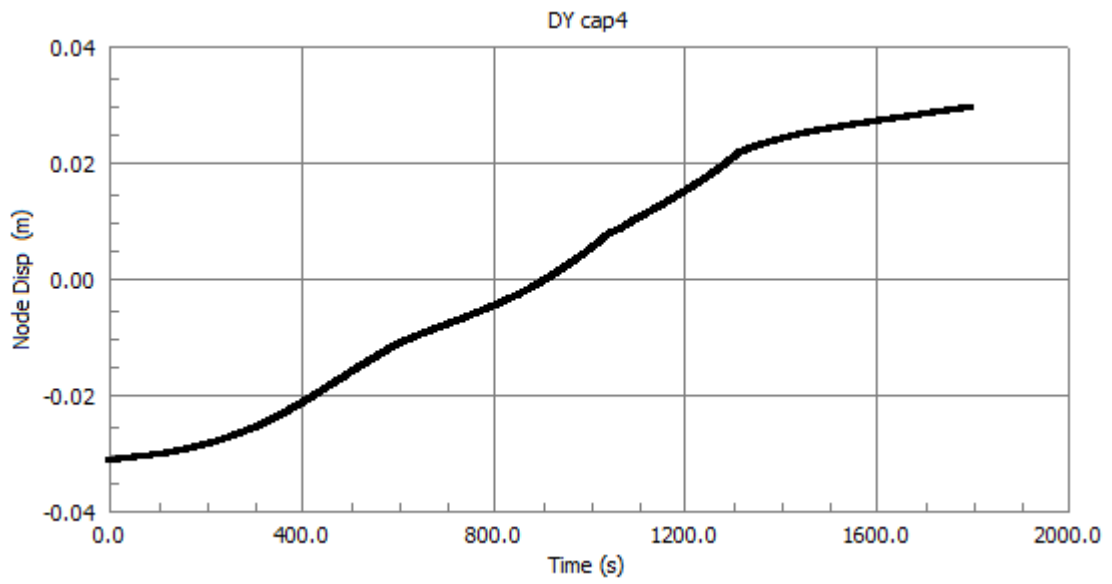
12



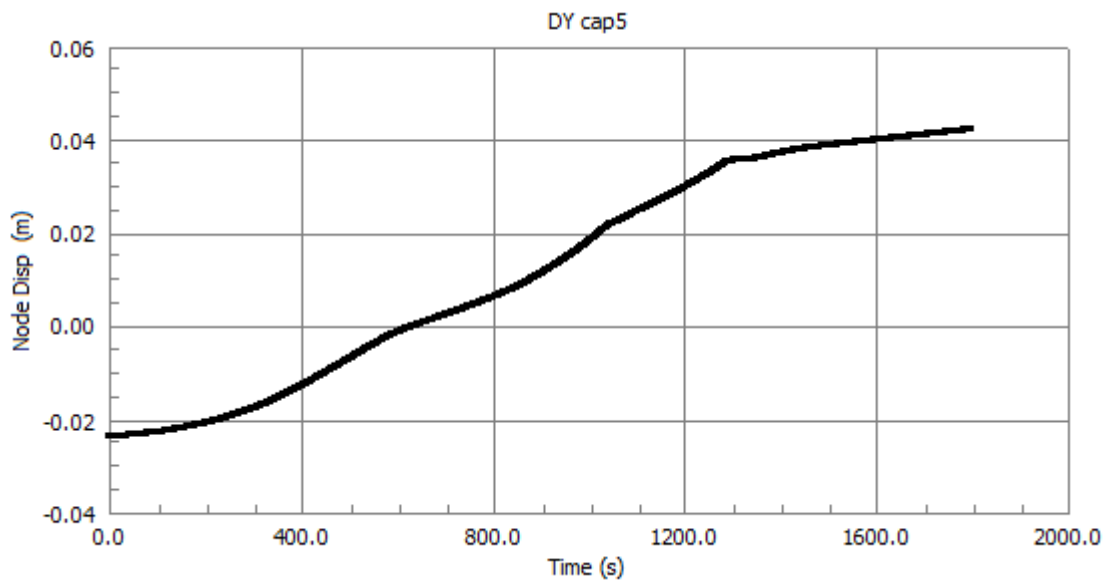
Punti di controllo spostamenti lungo l'asse Y

Nodo	Grafico														
<p>13</p>	<p>DY cap1</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for Node 13</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>400.0</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>800.0</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>1200.0</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>1600.0</td><td>0.062</td></tr> <tr><td>2000.0</td><td>0.068</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0.0	0.000	400.0	0.010	800.0	0.025	1200.0	0.050	1600.0	0.062	2000.0	0.068
Time (s)	Node Disp (m)														
0.0	0.000														
400.0	0.010														
800.0	0.025														
1200.0	0.050														
1600.0	0.062														
2000.0	0.068														
<p>14</p>	<p>DY cap2</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for Node 14</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>-0.025</td></tr> <tr><td>400.0</td><td>-0.010</td></tr> <tr><td>800.0</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>1200.0</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>1600.0</td><td>0.038</td></tr> <tr><td>2000.0</td><td>0.045</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0.0	-0.025	400.0	-0.010	800.0	0.005	1200.0	0.025	1600.0	0.038	2000.0	0.045
Time (s)	Node Disp (m)														
0.0	-0.025														
400.0	-0.010														
800.0	0.005														
1200.0	0.025														
1600.0	0.038														
2000.0	0.045														
<p>15</p>	<p>DY cap 3</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for Node 15</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>Node Disp (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>-0.035</td></tr> <tr><td>400.0</td><td>-0.020</td></tr> <tr><td>800.0</td><td>-0.005</td></tr> <tr><td>1200.0</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>1600.0</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>2000.0</td><td>0.030</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	Node Disp (m)	0.0	-0.035	400.0	-0.020	800.0	-0.005	1200.0	0.015	1600.0	0.025	2000.0	0.030
Time (s)	Node Disp (m)														
0.0	-0.035														
400.0	-0.020														
800.0	-0.005														
1200.0	0.015														
1600.0	0.025														
2000.0	0.030														

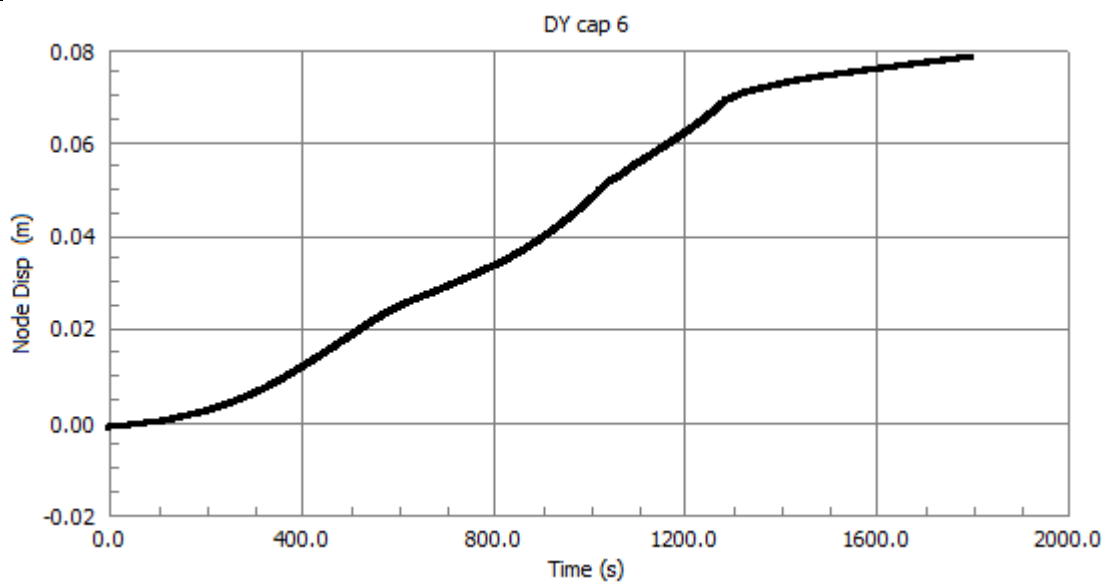
16



17

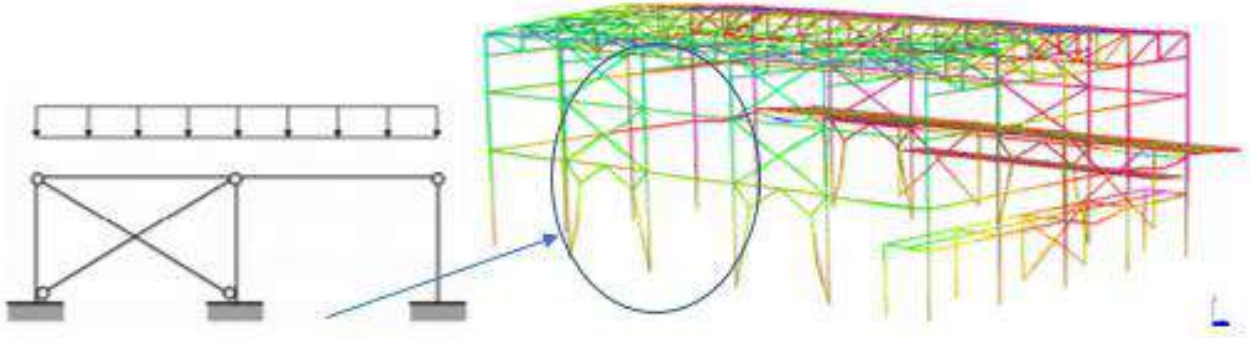


18

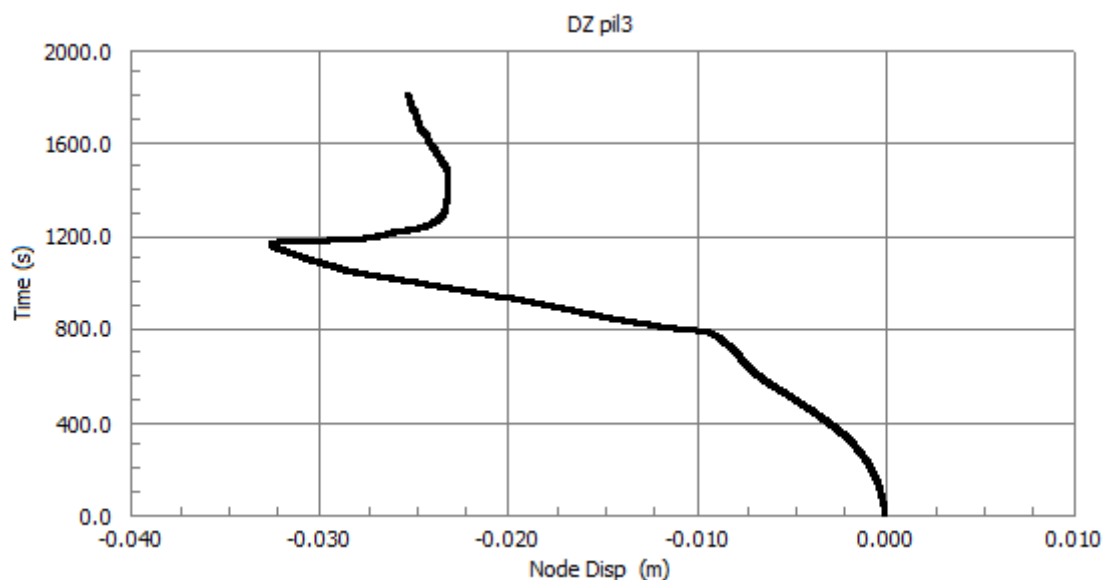


9. Effetto pendolo

Riferendosi alla trattazione del capitolo precedente si analizza il raggiungimento del collasso implosivo.



Di seguito si riporta l'andamento del pilastro numero lungo la direzione Z.



Si notano due delle quattro fasi trattate, ovvero un primo movimento in direzione negativa a causa della dilatazione termica per poi un ritorno verso l'interno. In questo caso non si arriva a collasso quindi non si vede lo svio della soluzione, inoltre si stabilizza intorno il valore di $z = -0.030$ m in quanto lo spostamento è contrastato dall'altra dilatazione del controvento adiacente.

7.4 VERIFICA NEL DOMINIO DELLE RESISTENZE

Di seguito si riportano le caratteristiche interne di sollecitazione dal modello FEM. Successivamente si individua l'elemento più sollecitato della struttura per il quale si effettueranno verifiche su momento e taglio.

La dilatazione termica, contrastata dalla rigidità tagliante delle colonne, provoca nelle travi riscaldate la nascita di uno sforzo normale di compressione.

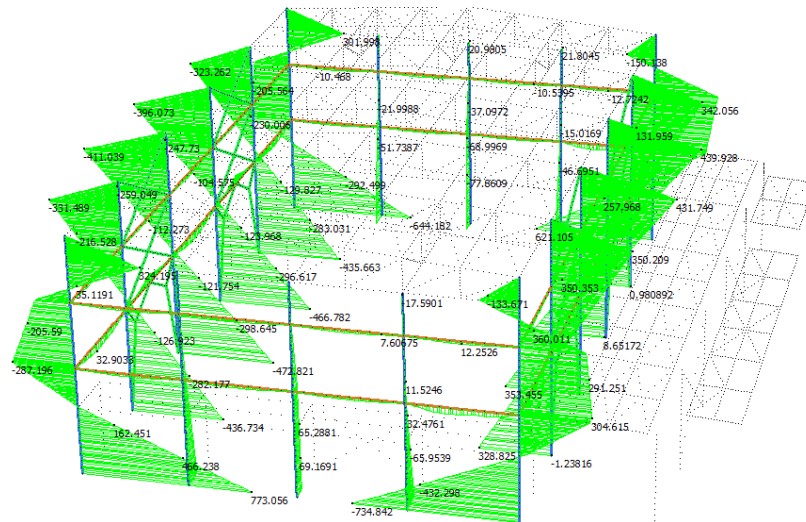
Contemporaneamente la curvatura termica determina un aumento del momento flettente negativo su tutta la trave.

Si presentano elevati valori di momento torcente nelle travi adiacenti al locale collettamente non riscaldato a causa della dilatazione verso l'alto dei controventi. Le colonne interne subiscono un incremento dello sforzo normale di compressione a causa della dilatazione parzialmente impedita dalla rigidità tagliante delle travi ordite in direzione trasversale e delle capriate.

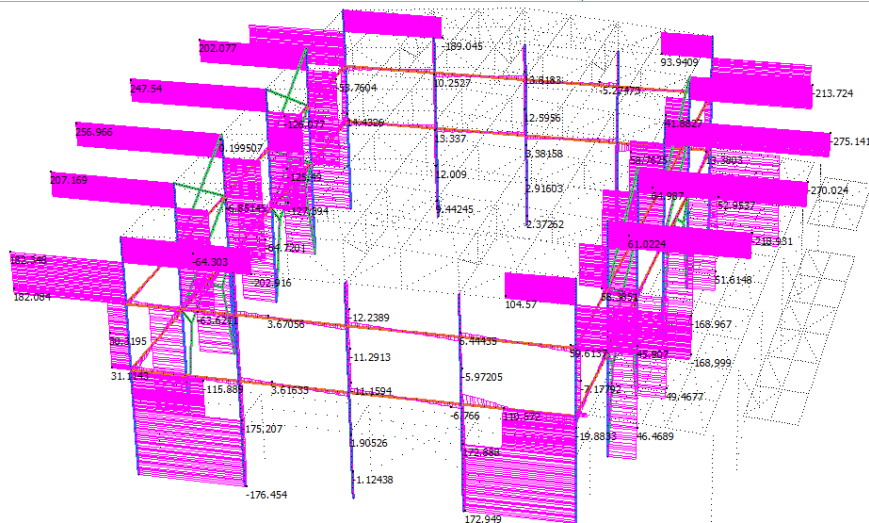
Il comportamento della struttura nella fase crescente delle temperature è simile a quello visto nel caso d'incendio standard.

Solitamente, si svolgono le verifiche utilizzando un confronto fra la curva della resistenza durante l'incendio e la curva delle sollecitazioni: la prima diminuisce in base alla temperatura, le seconde variano conseguentemente alle azioni indirette.

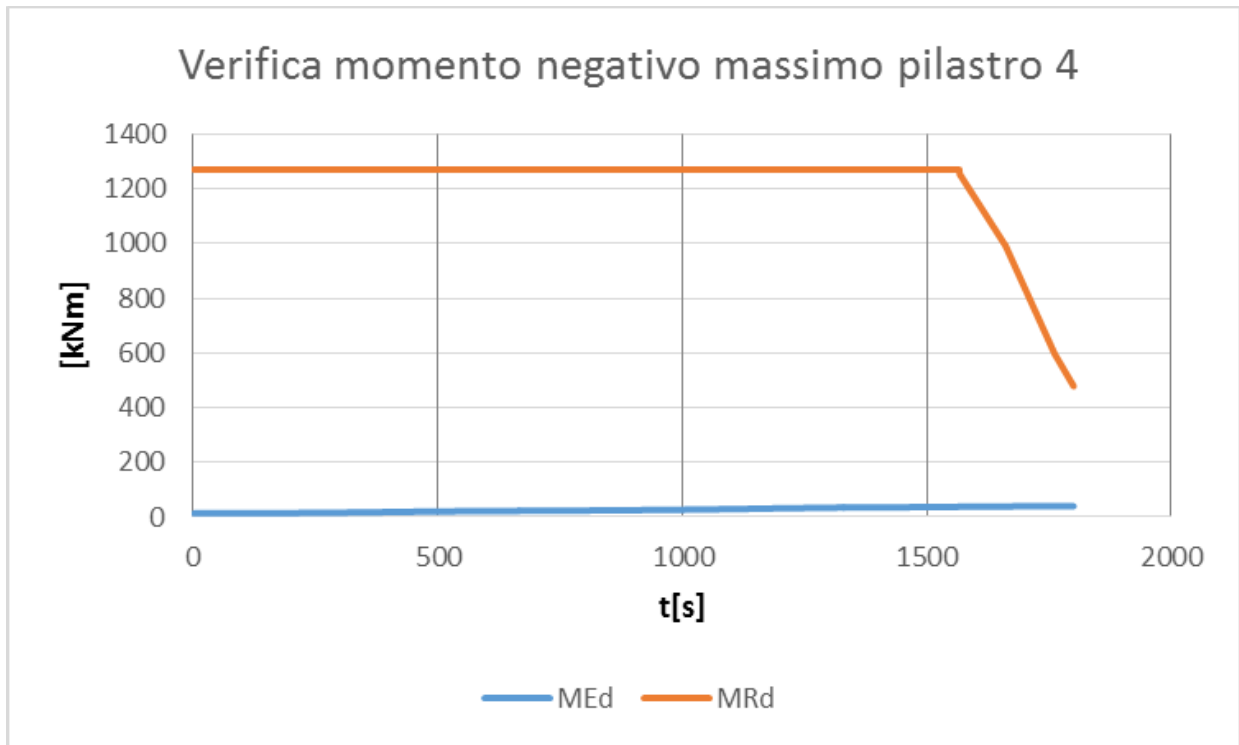
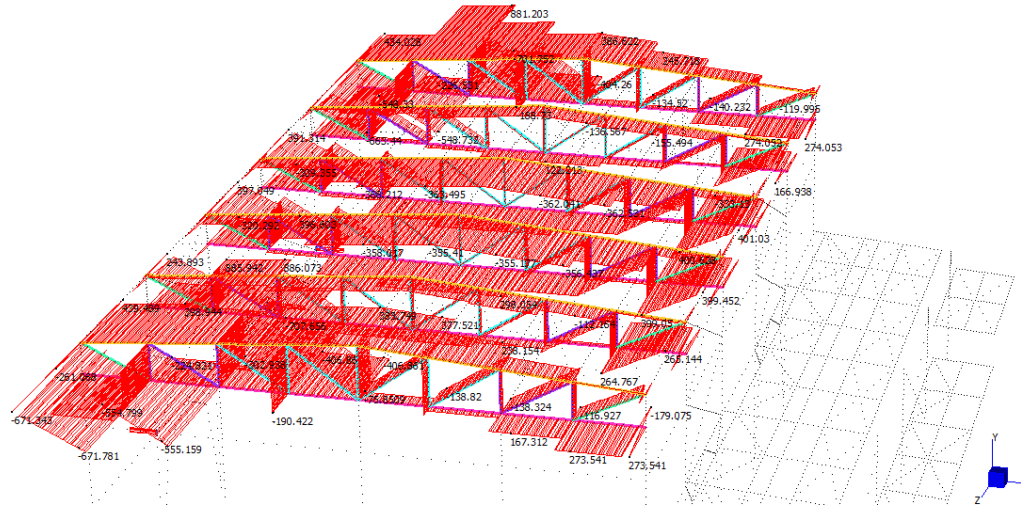
MIN	MAX
BM2(N.m)	-734.842 773.056
[Bm:3577]	[Bm:3559]

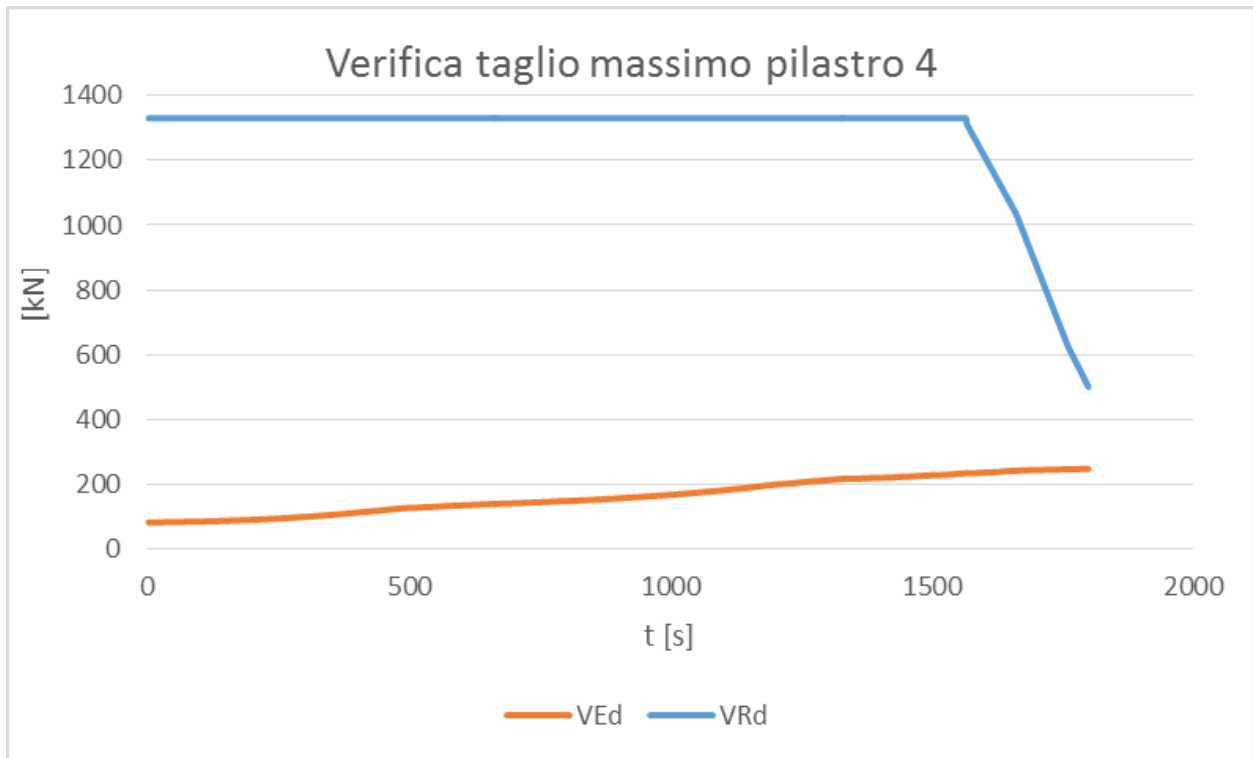


MIN	MAX
SF2(kN)	-275.141 256.966
[Bm:39]	[Bm:35]



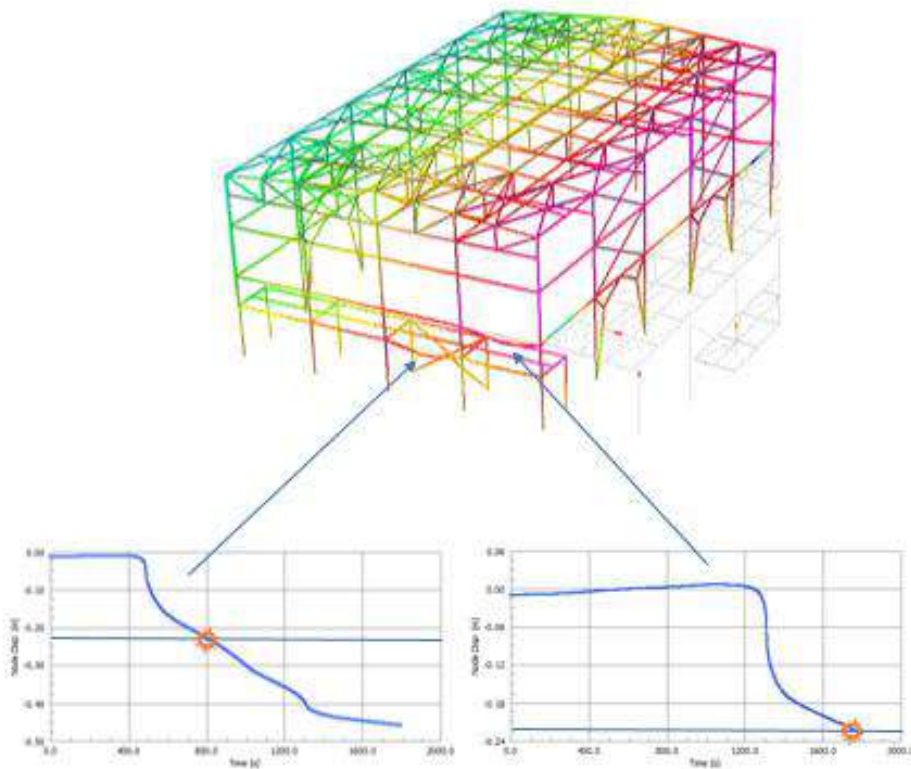
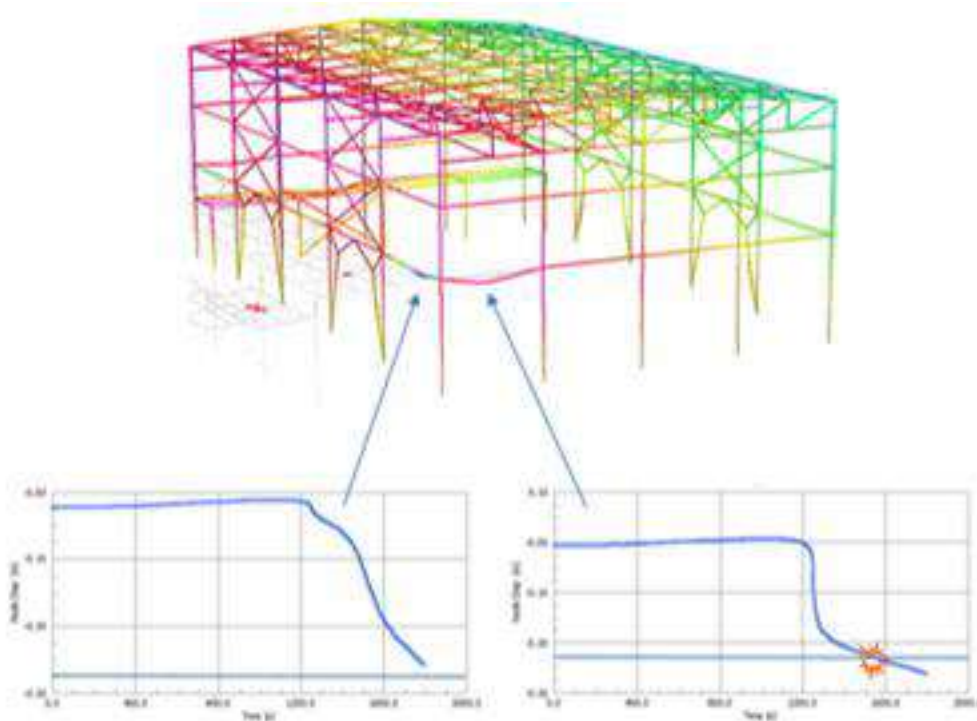
	MIN	MAX
AxForce(kN)	-707.656	886.073
[Bm:4378]	[Bm:92]	





7.5 VERIFICA DELLE DEFORMAZIONI

Relativamente agli elementi che riportano maggiori deformazioni si esegue una verifica nel campo degli spostamenti imponendo una freccia minore di $Dy=L/30$.



Si notano tre travi che giungono al limite convenzionale e si possono considerare collassate. La struttura comunque arriva a collasso dopo i 30 minuti grazie alla robustezza strutturale.

CONCLUSIONI

Dal confronto sviluppato tra l'analisi strutturale globale e l'analisi di singoli elementi si deduce, inoltre che l'analisi di singoli elementi che non tiene in conto né gli scenari d'incendio né le sollecitazioni che nascono per effetto delle dilatazioni termiche impedito, può dare risultati conservativi quando la crisi avviene sulle travi poiché le sollecitazioni su di esse risentono meno dell'effetto delle dilatazioni termiche impedito. Invece, il metodo di singoli elementi risulta a svantaggio di sicurezza quando la crisi si manifesta sulle colonne perché per questi elementi sono fondamentali gli effetti del secondo ordine.

Inoltre si nota un dimezzamento dei tempi di resistenza passando dal telaio alla struttura completa. Questi tempi sono protratti fino ai trenta minuti grazie all'utilizzo di un'analisi termomeccanica avanzata permessa dal Nuovo Codice di prevenzione incendi che permette tramite l'utilizzo di una soluzione alternativa, una progettazione in linea con gli Eurocodici.

Dal confronto tra i telai progettati e tra i diversi scenari si deduce che, grazie all'applicazione della FSE è possibile beneficiare di un grande risparmio economico pari a 138.000€, grazie ad una progettazione molto più attenta e dettagliata che aiuta a gestire eventuali sprechi dovuti ad una progettazione di tipo prescrittivo.

PROFILI	L [m]	Perimetro [m]	Superficie[m2]	Costo kg/m2	kg/m2 R240	Costo	kg/m2 R30	Costo	kg/m2 M.A	Costo
HEA550	184.98	2.209	408.62082	12	4.5	48742.743	2.1	22746.61	0.9	9748.55
IPE360	47.416	1.353	64.1539833	12	4.5	4687.2183	2.1	2187.369	0.9	937.444
HEA260	39.39	1.484	58.45476	12	4.5	4684.3306	2.1	2186.021	0.9	936.866
IPE330	21.711	1.254	27.2252178	12	4.5	1843.5828	2.1	860.3387	0.9	368.717
HEA220	84.76	1.255	106.3738	12	4.5	7208.9524	2.1	3364.178	0.9	1441.79
ILS300	466.18	1.16	540.7688	12	4.5	33873.758	2.1	15807.75	0.9	6774.75
L60x6	401.28	0.233	93.49824	12	5	1307.1054	2.8	731.979	1.4	365.99
PHI10	274.28	0.314159265	86.16666082	12	5	1624.2033	2.8	909.5538	1.4	454.777
L100x10	44.604	0.39	17.395521	12	5	407.05519	2.8	227.9509	1.4	113.975
L150x12	161.58	0.596	96.30168	12	5	3443.7481	2.8	1928.499	1.4	964.249
L90x9	94.421	0.351	33.1416657	12	5	697.96348	2.8	390.8595	1.4	195.43
L130x12	161.04	0.508	81.80832	12	5	2493.5176	2.8	1396.37	1.4	698.185
L80x8	142.79	0.311	44.408623	12	5	828.66491	2.8	464.0523	1.4	232.026
HEA200	21.75	1.136	24.708	12	4.5	1515.6876	2.1	707.3209	0.9	303.138
IPE450	82.89	1.605	133.03845	12	4.5	11530.442	2.1	5380.873	0.9	2306.09
L70x7	199.26	0.272	54.197904	12	5	884.50979	2.8	495.3255	1.4	247.663
IPE200	98.35	0.768	75.5328	12	4.5	3132.4963	2.1	1461.832	0.9	626.499
UNP180	238.54	0.698	166.49743	12	4.5	6275.6211	2.1	2928.623	0.9	1255.12
HEA180	276.88	1.024	283.52512	12	4.5	15677.805	2.1	7316.309	0.9	3135.56
IPE270	101.71	1.041	105.882192	12	4.5	5952.0615	2.1	2777.629	0.9	1190.41
2XILS300	42.38	2.32	98.3216	12	4.5	12317.73	2.1	5748.274	0.9	2463.55
PHI16	182.75	0.502654825	91.8611745	12	5	2770.4678	2.8	1551.462	1.4	775.731
PHI24	42.884	0.753982237	32.33407584	12	5	1462.7591	2.8	819.1451	1.4	409.573
						TOTALE [€]				
						€ 173,362	€ 82,388	€ 35,946		

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- Comportamento in caso d'incendio di elementi strutturali di carpenteria metallica – Prof.re Ing. Andrea Benedetti, CISM Ottobre 2003
- Progettazione di un deposito automatizzato in acciaio tramite l'ingegneria antincendio-Galeotti Gianluca, Battistini Filippo, Andrea Quarta
- Progetto delle strutture resistenti al fuoco – Andrew H. Buchanan
- Resistenza al fuoco delle costruzioni – Luca ponticelli, Mauro Caciolai
- Guida agli Eurocodici 1,2,3 e 4, resistenza al fuoco delle strutture: EN 1991-1.2, EN, EN 1992-1.2, EN 1993-1.2 e EN 1994-1.2 – T.Lennon, D.B. Moore, Y.C. Wang e C.G. Bailey traduzione di S.Tedeschi, C. De Domenico
- Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio calcestruzzo in caso di incendio secondo gli Eurocodici e le Norme Tecniche per le costruzioni – Emidio Nigro, Giuseppe Cafarelli, Sandro Pustorino e Paola Princi.
- Chimica e fisica dell'incendio – Servizio Tecnico Centrale, Ispettorato per la formazione professionale corsi multimediali (Ministero dell'interno – Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile)
- Chimica e fisica dell'incendio – Daniele Mercuri, Mirko Canestri (Ministero dell'interno Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile)
- La modularizzazione nelle strutture industriali in acciaio aspetti legati alla resistenza al fuoco – Tesi di laurea di Alessandro Trabucchi
- Corso: Scienza e Tecnica della prevenzione Incendi A.A. 2014-2015 – Unipi - Docente: Nicola Marotta, Slide: Carico d'incendio
- Fire – induced collapse of steel structures: basic mechanisms and countermeasures – Alexandra Dondera e Luisa Giuliani, Technical University of Denmark, Civil engineering department, Kgs. Lyngby, DK

- factors affecting the behavior of steel structures in fire – Xiao jie yang e Ri gao – cole of civil e achitecture engineering, beijing jiaotong university, beijing,100044,china
- -Corso di resistenza al fuoco e progettazione strutturale antincendio- analisi strutturale in caso di incendio- Chiara Crosti – Padova
- -Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects – A.S.Usmani, J. M. Rotter, S. Lamont, A.M. Sanad, M.Gillie.
- EUROCODICE 1, “Action on structures – Part 1-2: General Actions– Action on structures exposed to fire.
- UNI-CNR (28-12-1999), “Istruzioni per la progettazione di costruzioni resistenti al fuoco”.
- EUROCODE 2, “Design of concrete structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”.
- EUROCODE 3, “Design of steel structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”..
- EUROCODE 4, “Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”.
- EUROCODE 5, “Design of Timber Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”.
- EUROCODE 6, “Design of Masonry Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”.
- EUROCODE 9, “Design of Aluminium Structures – Part 1-2: General Rules Structural Fire Design”.
- D.M.14 settembre 2005, “NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI”,G.U. n. 222 del 23 settembre 2005.
- DECRETO del Ministero dell’Interno del 16 febbraio 2007, “Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione”, GU n. 74 del 29 marzo 2007.

- DECRETO del Ministero dell'Interno del 9 marzo 2007, “Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco”, GU n. 74 del 29 marzo 2007.
- DECRETO del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007, “Direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio”, GU n. 117 del 22 maggio 2007.
- D.M. 14 gennaio 2008, “NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI”, supplemento Ordinario della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 4 febbraio 2008, n. 29.
- D.M. 3 agosto 2015 Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139. (GU n. 192 del 20/8/2015 - S.O. n. 51)

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno collaborato per la realizzazione della presente Tesi.

I miei più sentiti ringraziamenti vanno:

- Al Prof. Ing. Andrea Benedetti, *relatore* della presente Tesi, per gli stimoli che hanno acceso il mio interesse nei confronti degli argomenti presenti in questo elaborato, per avermi mostrato alcuni aspetti relativi agli stessi che avrei probabilmente trascurato senza il suo aiuto, per la sua estrema disponibilità, per la sua pazienza e per la fiducia che ha riposto in me;
- A FSE PROGETTI S.r.l. e ai *correlatori* Dottor Ing. Gianluca Galeotti e Dottor Ing. Filippo Battistini per l'entusiasmo che mi hanno trasmesso, per avermi dato l'opportunità e la fiducia di essere un loro tirocinante, per l'esempio datomi, per la possibilità di effettuare importanti esperienze, per i confronti costruttivi, per i loro insegnamenti e gli spunti per la stesura di questa Tesi, nel corso della quale hanno sempre dimostrato una grandissima disponibilità, senza la quale il presente elaborato avrebbe avuto certamente un risultato inferiore;
- Al VF Ing. Claudio Gamberi, *correlatore* della Tesi, per avermi dato, utilizzando la sua grande esperienza, un fondamentale aiuto nella progettazione e nelle considerazioni riguardanti le situazioni di maggiore pericolo nell'eventualità d'incendi, sia per ciò che concerne l'incolumità umana, sia per quanto riguarda i danni arrecati alle strutture e all'ambiente, permettendomi di raggiungere un'ampia ed approfondita visione del fenomeno illustrato nelle pagine precedenti;
- Ad Ecosteel S.r.l. e al Dottor Ing. Mariano Corrà per il materiale fornitomi in modo da permettermi di lavorare accuratamente alla realizzazione del presente elaborato;
- Ad HSH S.r.l. per la grande disponibilità nei quesiti tecnici, oltre che per avermi concesso la licenza del software utilizzato ai fini della Tesi.

- Alla mia Famiglia va il mio ringraziamento più grande, senza loro sicuramente non sarei arrivato fin qui.
Un grazie a Luca per avermi aiutato nella stesura della Tesi.