

INAIL

I 
CONSIGLIO
NAZIONALE
INGEGNERI



Il Codice di prevenzione incendi, applicazioni pratiche per la progettazione antincendio



**Soluzioni progettuali di resistenza al
fuoco con metodo analitico**

PIATTAFORMA WEBINAR FONDAZIONE CNI
martedì 15 dicembre 2020

Relatore

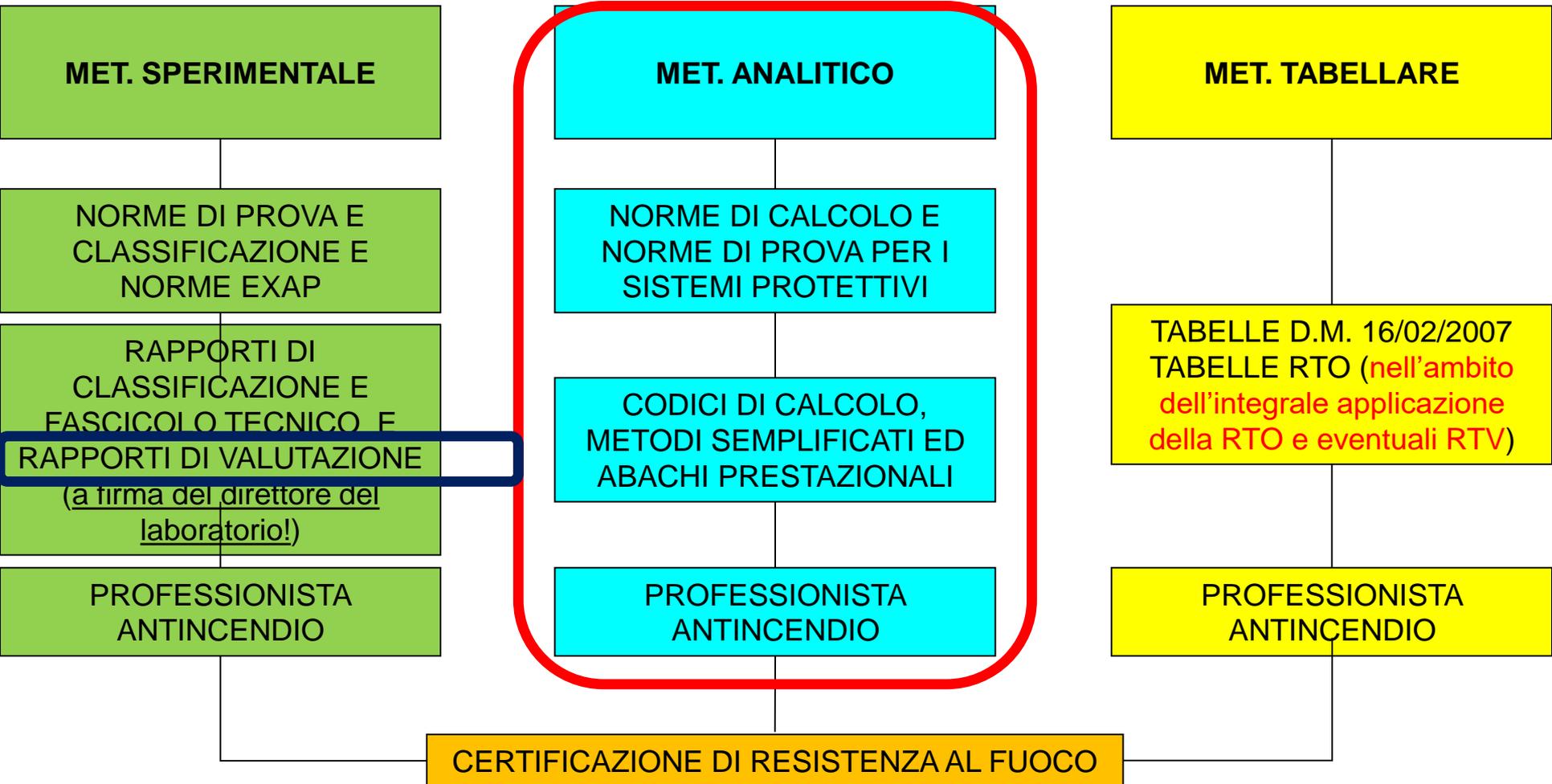
Ing. Andrea Marino, PhD, Comando VV.F. di Perugia

Si affronteranno i seguenti punti:

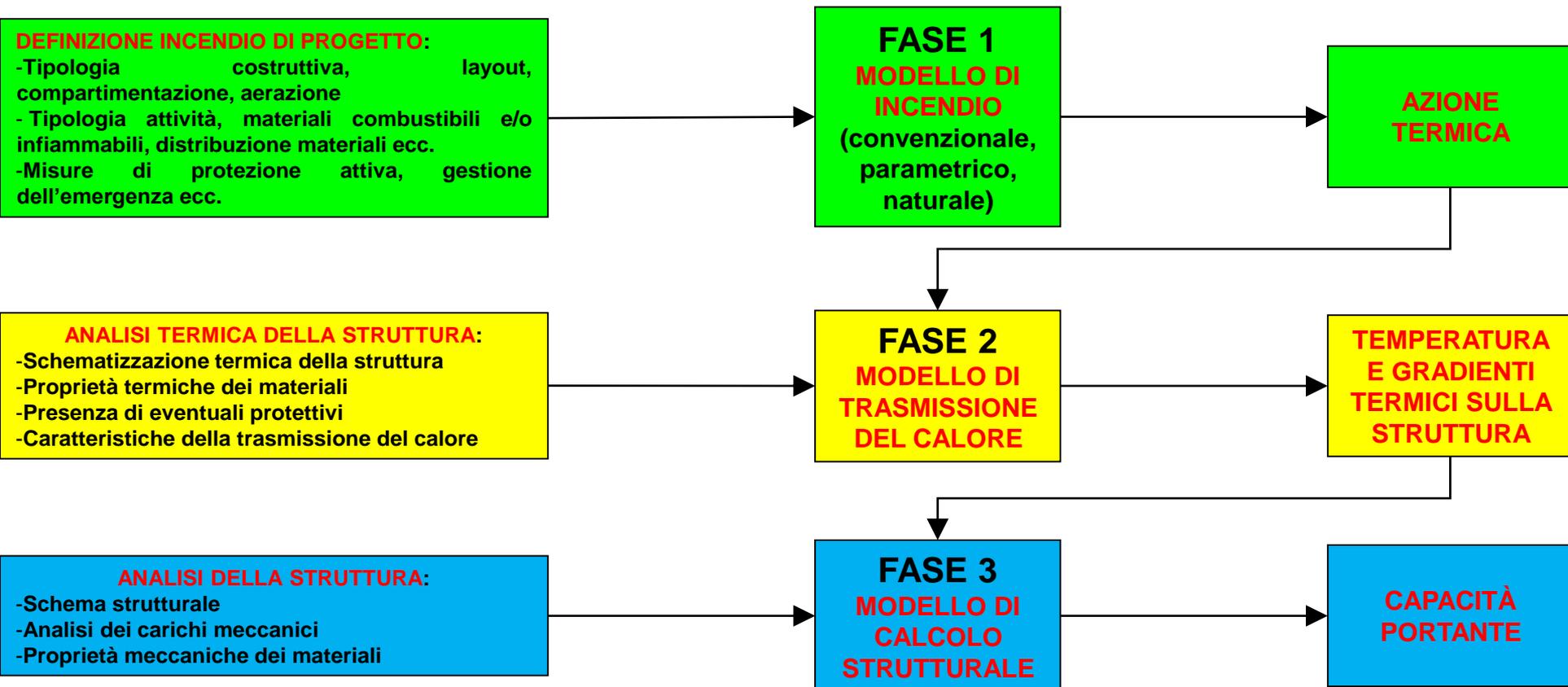
- **PREMESSA**: considerazioni generali sul metodo analitico
- **SOLUZIONI PROGETTUALI S.2**: considerazioni sulle soluzioni conformi ed alternative previste dalla misura antincendio S.2 – Resistenza al fuoco
- **ESEMPI APPLICATIVI**: metodo analitico su singolo elemento in CAP e su un'intera struttura 3D in acciaio

PREMESSA:
CONSIDERAZIONI GENERALI

CERTIFICATORI (D.M. 07/08/2012)



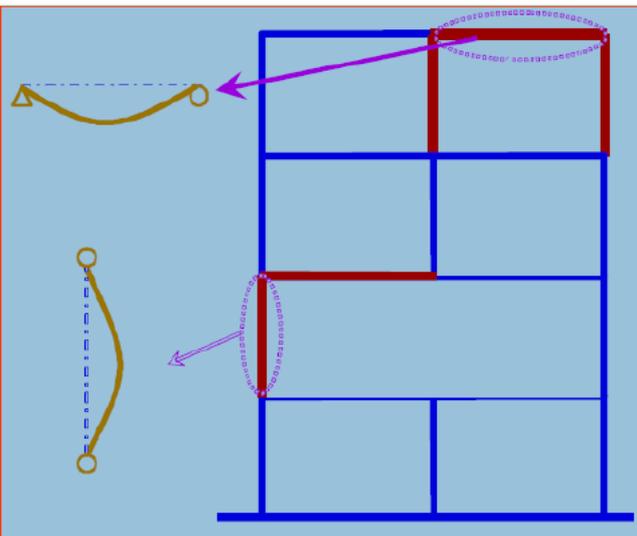
SCHEMA DI PROCEDIMENTO DI VERIFICA DELLA RESISTENZA AL FUOCO



S.2 – CRITERI DI PROGETTAZIONE

CRITERI DI PROGETTAZIONE STRUTTURALE IN CASO DI INCENDIO

- capacità del sistema strutturale in caso di incendio
 - elementi strutturali singoli (di norma soluzioni conformi)
 - porzioni di struttura (di norma soluzioni alternative)
 - intero sistema costruttivo (di norma soluzioni alternative)
- Si tiene conto della eventuale presenza di materiali protettivi.

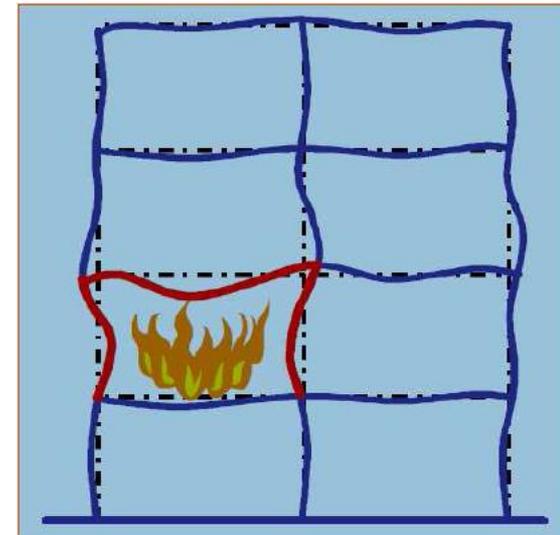


SOLUZ. ALTERNATIVE

Verifica di porzioni di struttura
(significative)

SOLUZ. CONFORMI

Verifica di elementi singoli



S.2 – CRITERI DI PROGETTAZIONE

CRITERI DI PROGETTAZIONE STRUTTURALE IN CASO DI INCENDIO

Le deformazioni ed espansioni imposte o impedito dovute ai cambiamenti di temperatura per effetto dell'esposizione al fuoco producono sollecitazioni indirette, forze e momenti nei singoli elementi strutturali, che devono essere tenuti in considerazione, ad eccezione dei seguenti casi:

- a. è riconoscibile a priori che esse sono trascurabili o favorevoli;
- b. i requisiti di sicurezza all'incendio sono valutati in riferimento ad una curva nominale d'incendio di cui al paragrafo S.2.7.

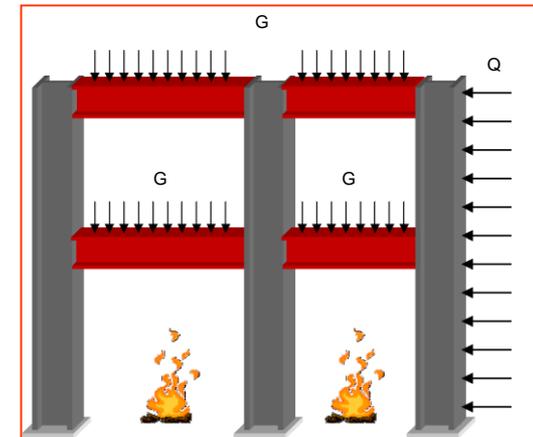
Uso della combinazione dei carichi per azioni eccezionali prevista dalle vigenti NTC.

$$\sum_{J \geq 1} G_{k,j} + P_k(t) + \sum_{J \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} + A_d(t)$$

COMBINAZIONE DI CARICO ECCEZIONALE: NTC 2018

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

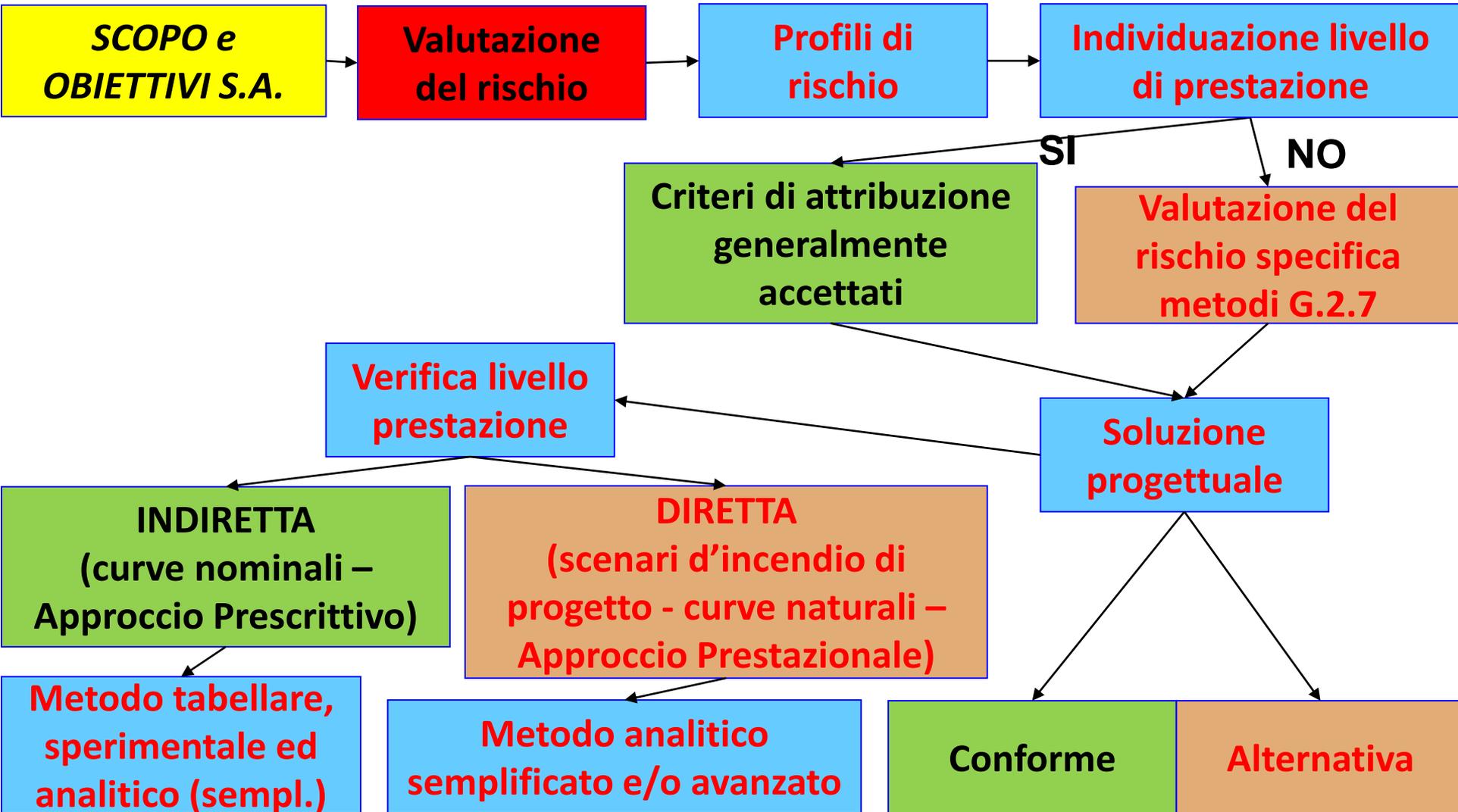
Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse , parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I – Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)	da valutarsi caso per caso		
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



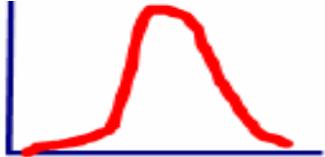
$$\sum_{J \geq 1} G_{k,j} + P_k(t) + \sum_{J \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} + A_d(t)$$

SOLUZIONI PROGETTUALI S.2:
CONFORMI ED ALTERNATIVE

S.2 – PROGETTAZIONE E VERIFICA



S.2 – PROGETTAZIONE E VERIFICA

SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA E SOLUZIONI PROGETTUALI	SOLUZIONI CONFORMI	SOLUZIONI ALTERNATIVE
		
Analisi per singoli elementi	SI	NO (SALVO CASI RARI)
Analisi per parti della struttura	SI (NON HA SENSO)	SI
Analisi globale della struttura	SI (NON HA SENSO)	SI

SOLUZIONI CONFORMI S.2

LIVELLI I-II-III -> CONTROLLO DEL COLLASSO (I e II) E MANTENIMENTO CAPACITÀ PORTANTE (III)

GLI STRUMENTI PER LA PROGETTAZIONE SONO:

- calcolo distanza di separazione (solo L.d.P. I e II) $\geq H_{max}$ opera da costruzione (**L.d.P. I e II**)
- utilizzo incendi convenzionali di progetto (curve nominali)
- metodo delle classi di resistenza al fuoco e calcolo di $q_{f,d}$ (**L.d.P. II e III**)
- verifiche nel dominio delle resistenze e della temperatura per singoli elementi strutturali

SOLUZIONI CONFORMI S.2

LIVELLI IV-V -> MANTENIMENTO CAPACITÀ PORTANTE E VERIFICHE SU DEFORMAZIONI E SPOSTAMENTI

IN AGGIUNTA:

- calcolo stato deformativo -> verifica compartimentazione
- giunti tra gli elementi di compartimentazione -> assecondare i movimenti
- capacità di compartimentazione -> comunicazioni con elementi a tenuta di fumo (EIS_{200}) e pareti con resistenza meccanica (M) aggiuntiva
- verifica impianti significativi -> NO soluzioni conformi
- controllo del danneggiamento di tutti gli elementi strutturali -> limiti di deformabilità imposti dalle NTC per le verifiche agli SLE.

SOLUZIONI ALTERNATIVE S.2

LIVELLI I-II-III -> CONTROLLO DEL COLLASSO (I e II) E MANTENIMENTO CAPACITÀ PORTANTE (III)

GLI STRUMENTI PER LA PROGETTAZIONE SONO:

- utilizzo di scenari di incendio di progetto e relativi incendi naturali (FSE) – vengono meno le classi di resistenza al fuoco
- calcolo non lineare (per geometria e materiali) di sottostrutture o di intere strutture nel dominio del tempo
- analisi dinamica non lineare e transiente
- verifica analitica meccanismi di collasso di porzioni di struttura o di intere strutture (**L.d.P. I e II**) -> **COLLASSO IMPLOSIVO**
- possibile adozione di sistemi a disponibilità superiore per la riduzione del cemento termico e per la capacità di compartimentazione

SOLUZIONI ALTERNATIVE S.2

LIVELLI IV-V -> MANTENIMENTO CAPACITÀ PORTANTE E VERIFICHE SU DEFORMAZIONI E SPOSTAMENTI

IN AGGIUNTA:

- calcolo e verifica stato deformativo di sottostrutture o di intere strutture nel dominio del tempo e per SLE
- verifica parametri di danneggiamento e di funzionalità stabiliti da progettista e committente (in funzione anche di SLE)

ESEMPI APPLICATIVI:
SINGOLO ELEMENTO IN CAP
SOLUZIONE CONFORME

TEGOLO IN CAP**RESISTENZE DI PROGETTO DEI MATERIALI IN CONDIZIONI DI INCENDIO.**

$$f_{cd,fi} = \frac{0,83 \cdot R_{ck}}{\gamma_{c,fi}} = \frac{0,83 \cdot 30}{1,0} = 24,90 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,fi} = \frac{f_{p1k}}{\gamma_{p,fi}} = \frac{1630}{1,0} = 1630 \text{ N/mm}^2$$

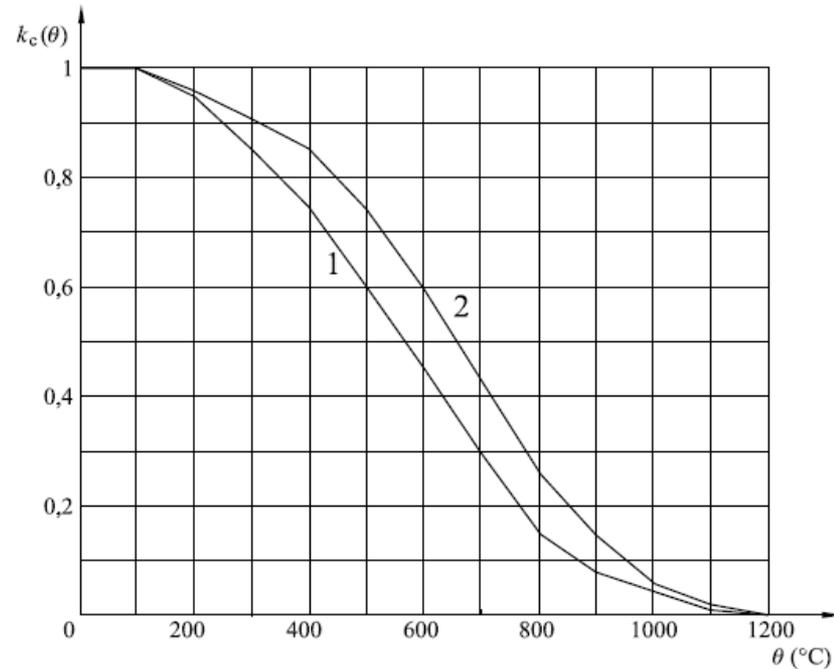
$$f_{yd,fi} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{y,fi}} = \frac{458}{1,0} = 458 \text{ N/mm}^2$$

TEGOLO IN CAP

DIMINUIZIONE DELLA RESISTENZA DI PROGETTO DEL CLS IN CONDIZIONI DI INCENDIO.

Curva 1: cls ordinario con aggregati silicei

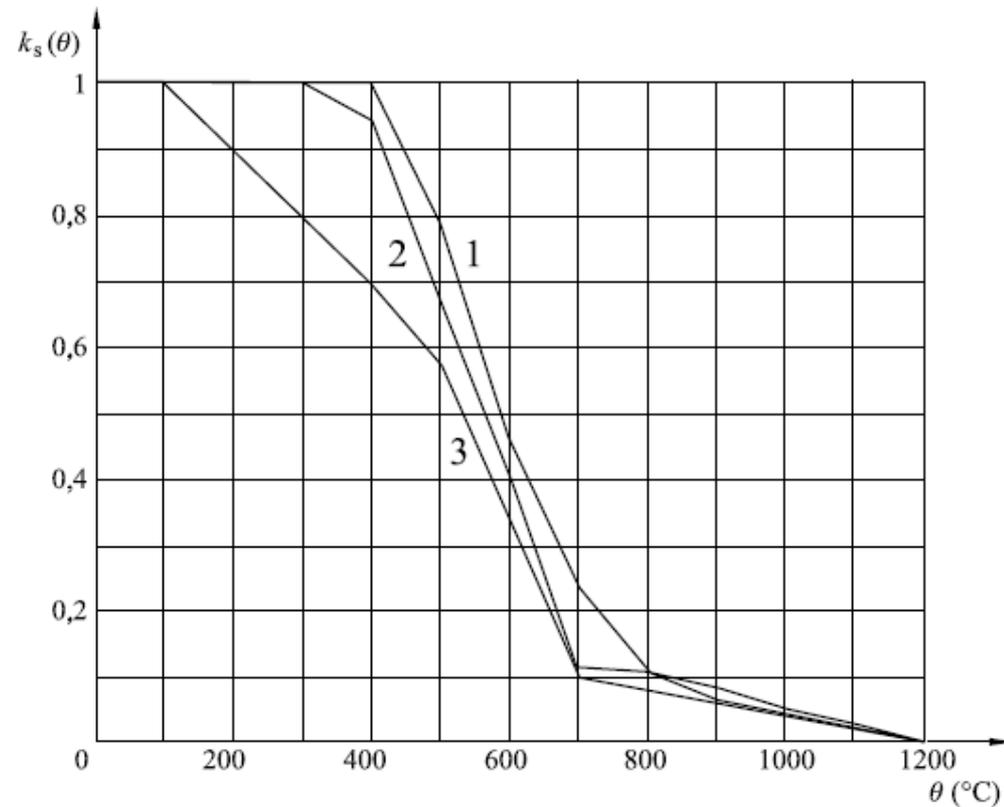
Curva 2: cls ordinario con aggregati calcarei



TEGOLO IN CAP

DIMINUIZIONE DELLA RESISTENZA DI PROGETTO DELL'ACCIAIO IN CONDIZIONI DI INCENDIO.

- Curva 1: armatura tesa (laminata a caldo) per $\varepsilon_s, f_i \geq 2\%$
- Curva 2: armatura tesa (trafilata a freddo) per $\varepsilon_s, f_i \geq 2\%$
- Curva 3: armatura compressa e tesa per $\varepsilon_s, f_i < 2\%$



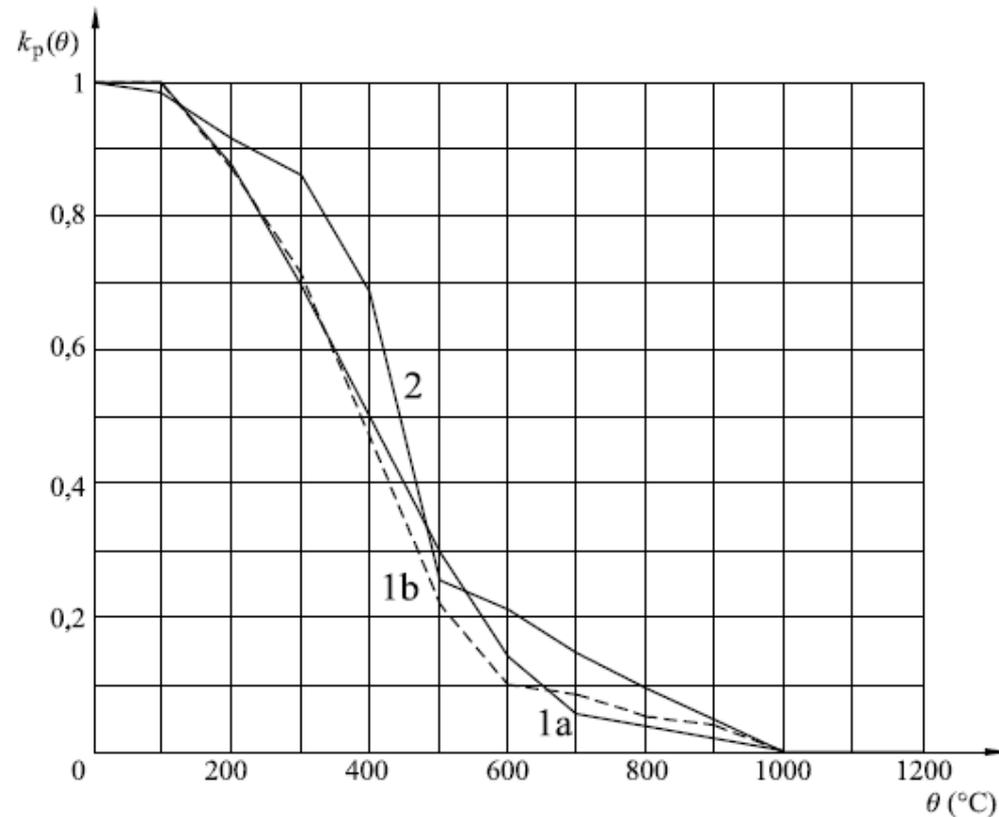
TEGOLO IN CAP

DIMINUZIONE DELLA RESISTENZA DI PROGETTO DELL'ACCIAIO ARMONICO IN CONDIZIONI DI INCENDIO.

Curva 1a: acciaio da pretensione trafilato a freddo (fili e trefoli (Classe A)

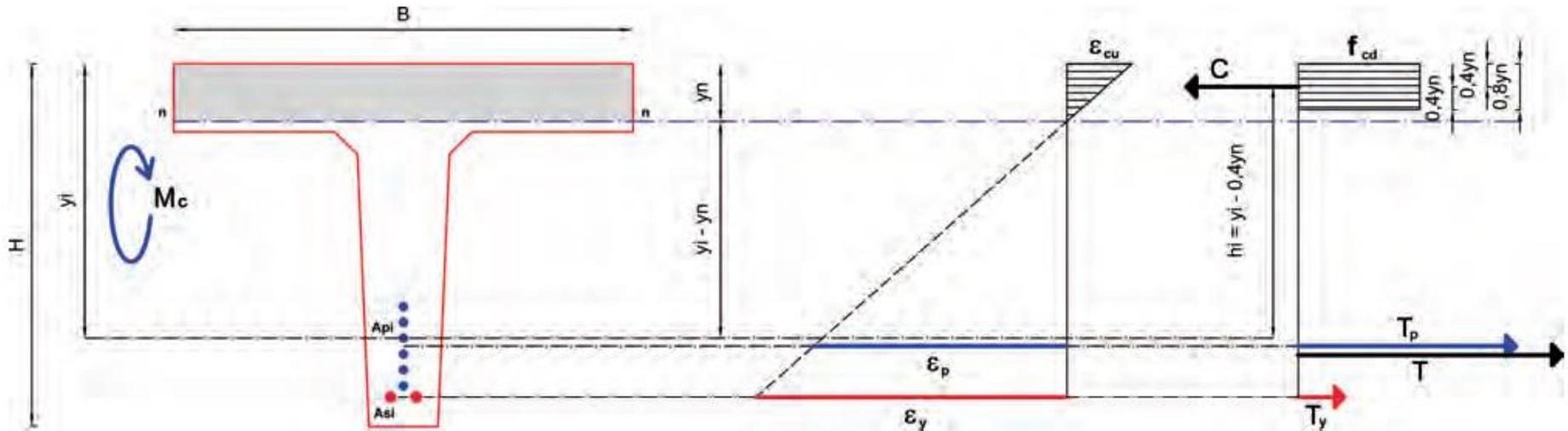
Curva 1b: acciaio da pretensione trafilato a freddo (fili e trefoli (Classe B) – **Prescritta da D.M. 31/07/2012**

Curva 2: acciaio da pretensione bonificato e temperato (barre)



TEGOLO IN CAP

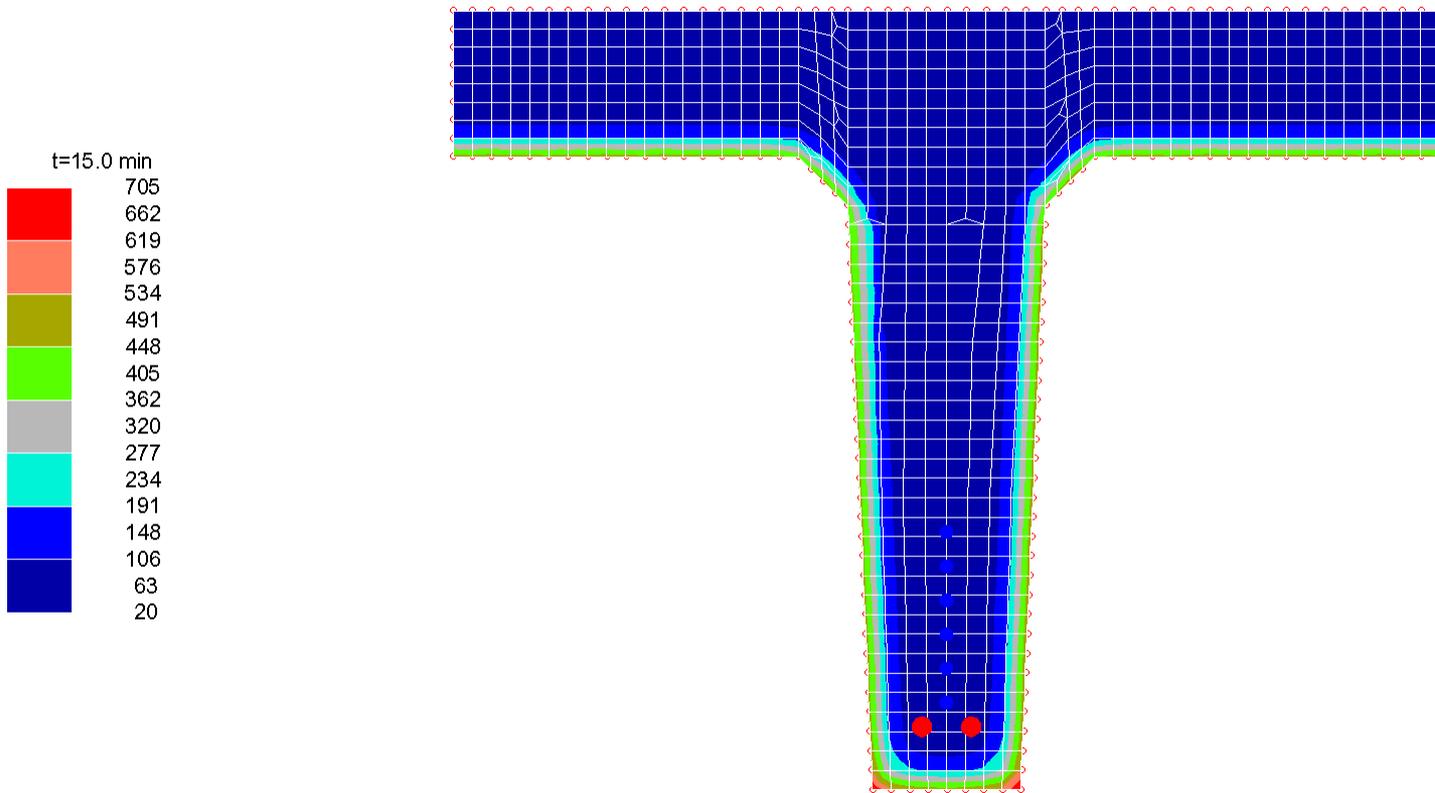
Calcolo manuale applicando il metodo plastico.



Armatura acciaio	Temperatura acciaio (°C)	Area A_i acciaio (mm ²)	Fattore k_i di riduzione	Area ridotta ($k_i \times A_i$) acciaio (mm ²)	y_i acciaio (mm)	Braccio h_i della coppia interna (mm)	Braccio h'_i della coppia interna (mm)	$f_{pd} \times A'_{pi} \times h'_i$ (kNm)	$f_{yd} \times A'_{si} \times h'_i$ (kNm)
1	348	139	0,604	84	710	659	680	93	
2	359	139	0,582	81	675	624	645	85	
3	366	139	0,568	79	640	589	610	78	
4	383	139	0,534	74	605	554	575	70	
5	411	139	0,478	66	570	519	540	58	
6	435	139	0,43	60	535	484	505	49	
7	551	314	0,622	195	735	684	705		63
8	551	314	0,622	195	735	684	705		63
		834		444				434	126
		628		391					
							M'_R	560	

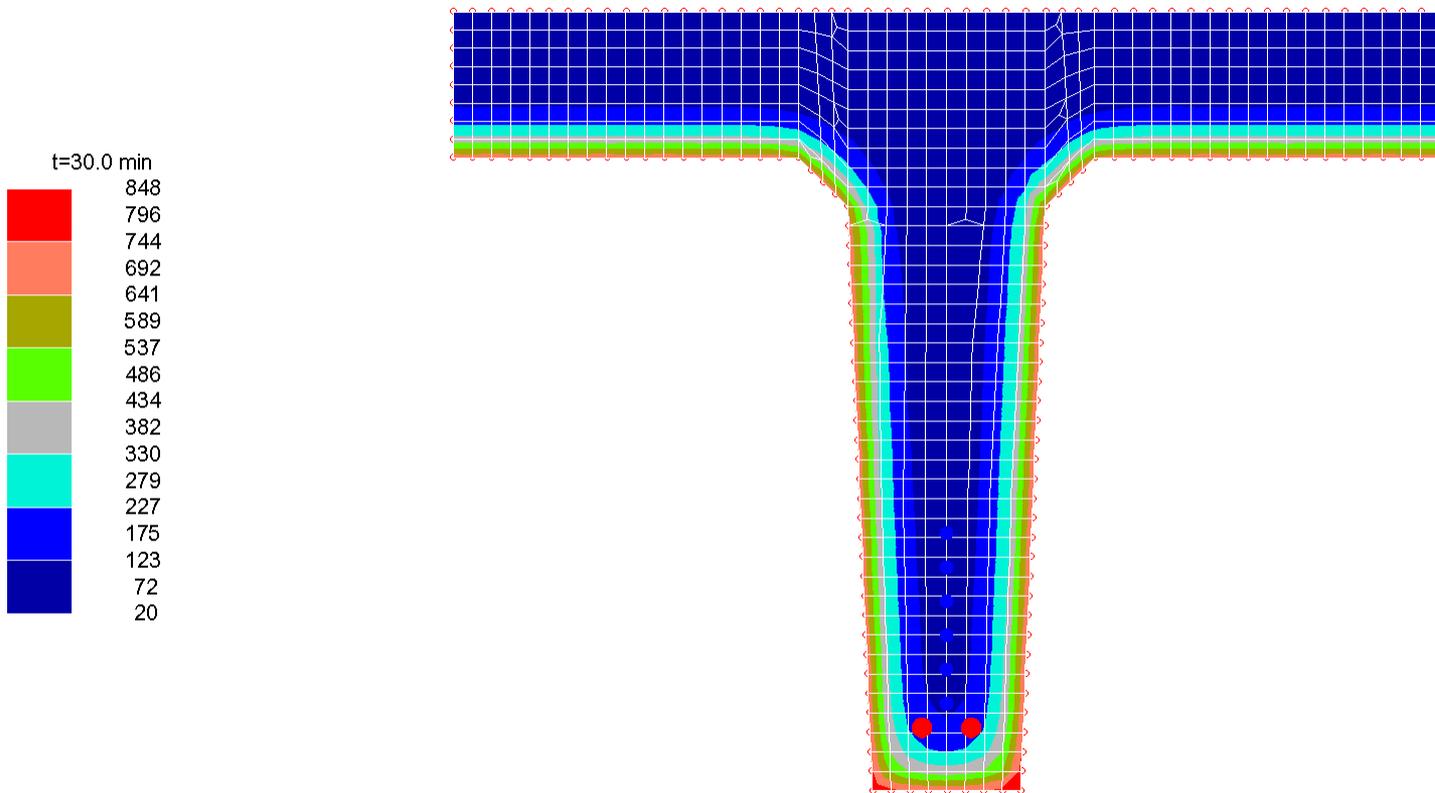
TEGOLO IN CAP

ANALISI TERMICA (t=15 min).



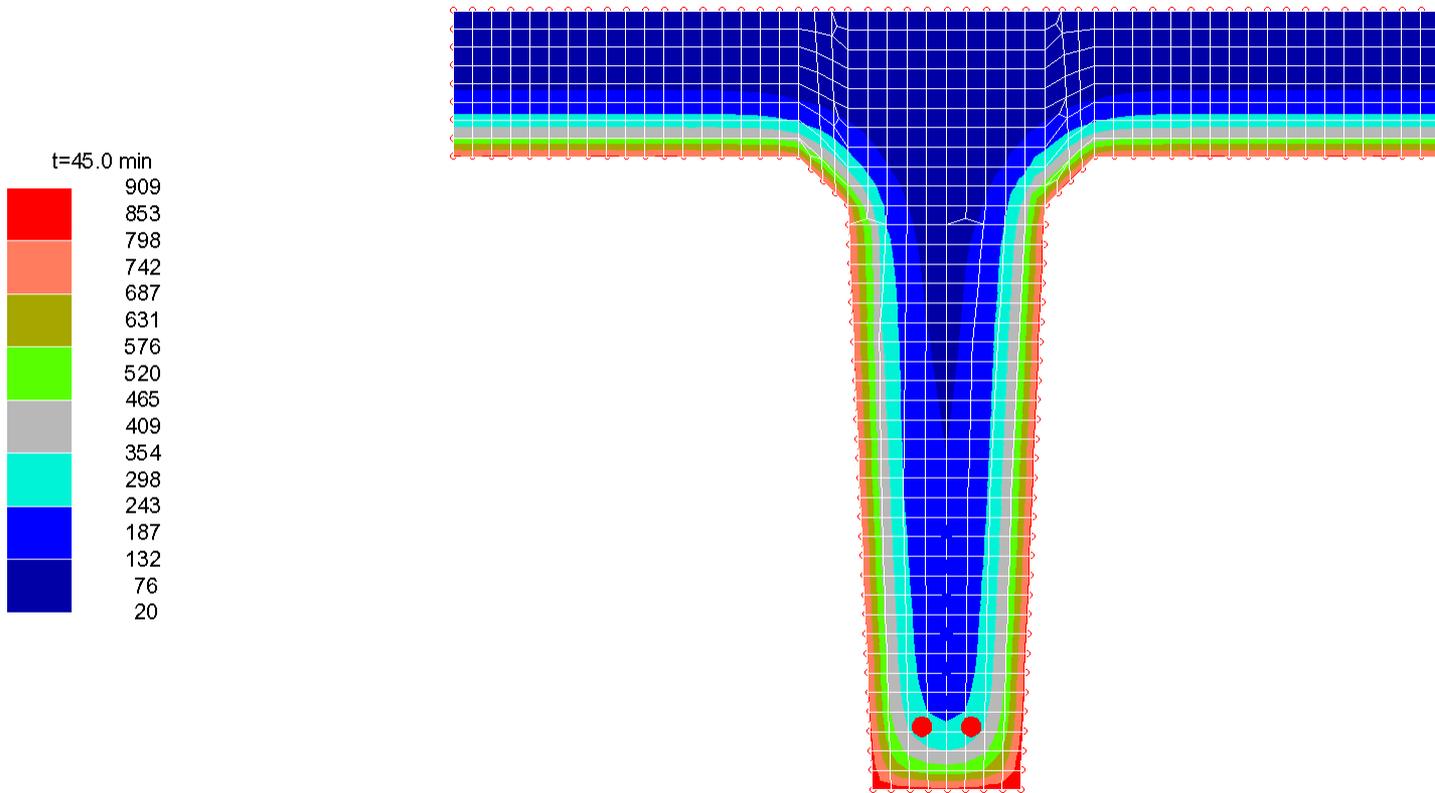
TEGOLO IN CAP

ANALISI TERMICA (t=30 min).



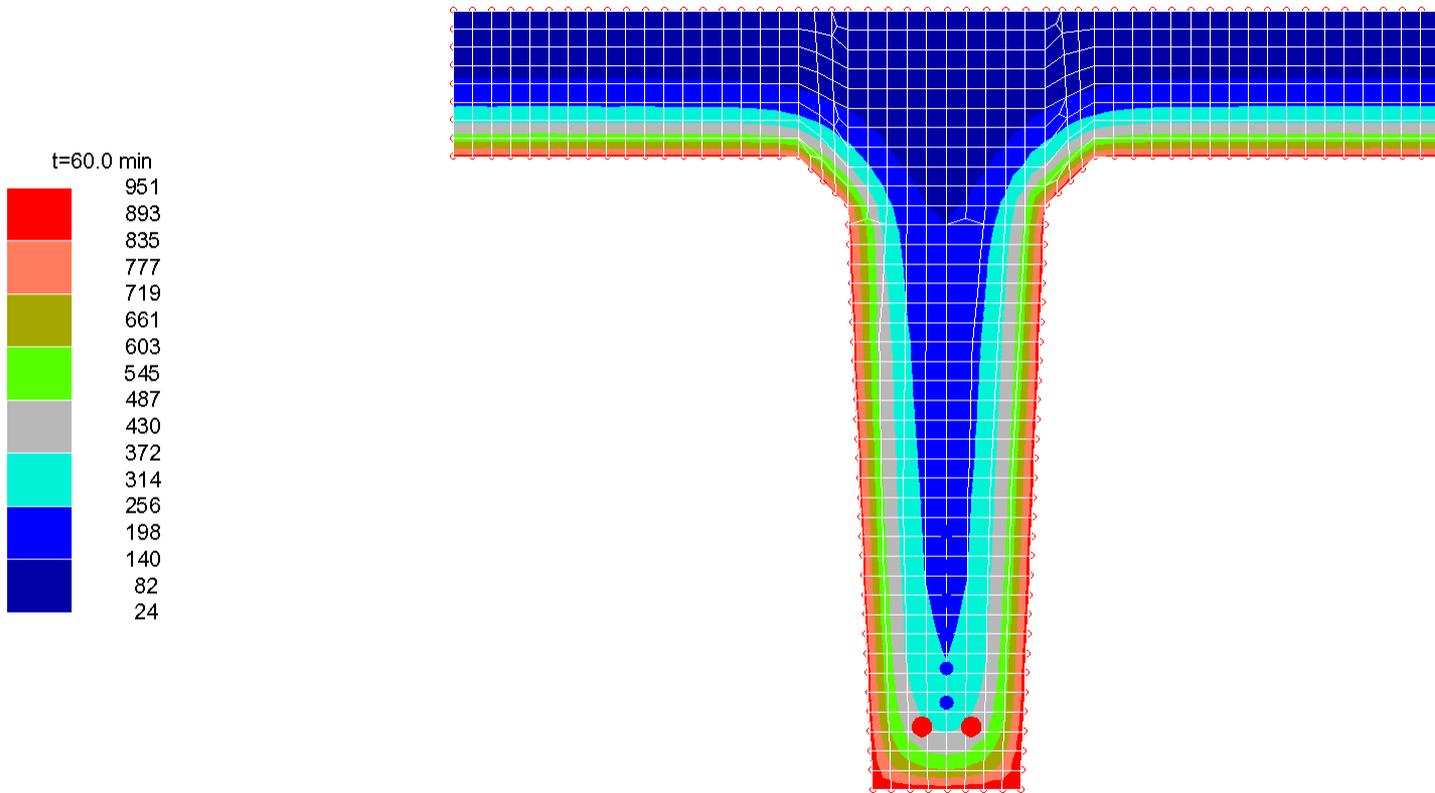
TEGOLO IN CAP

ANALISI TERMICA (t=45 min).



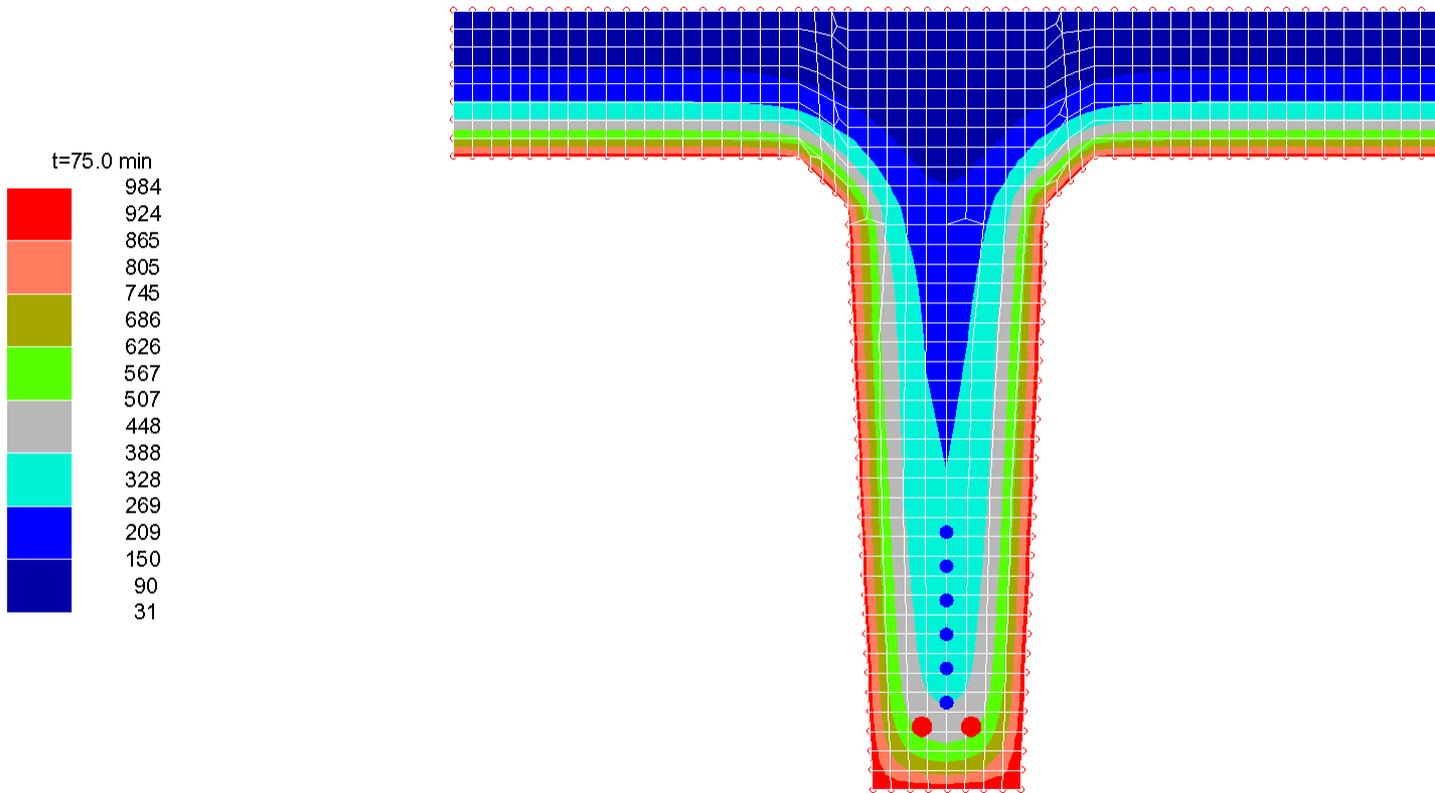
TEGOLO IN CAP

ANALISI TERMICA (t=60 min).



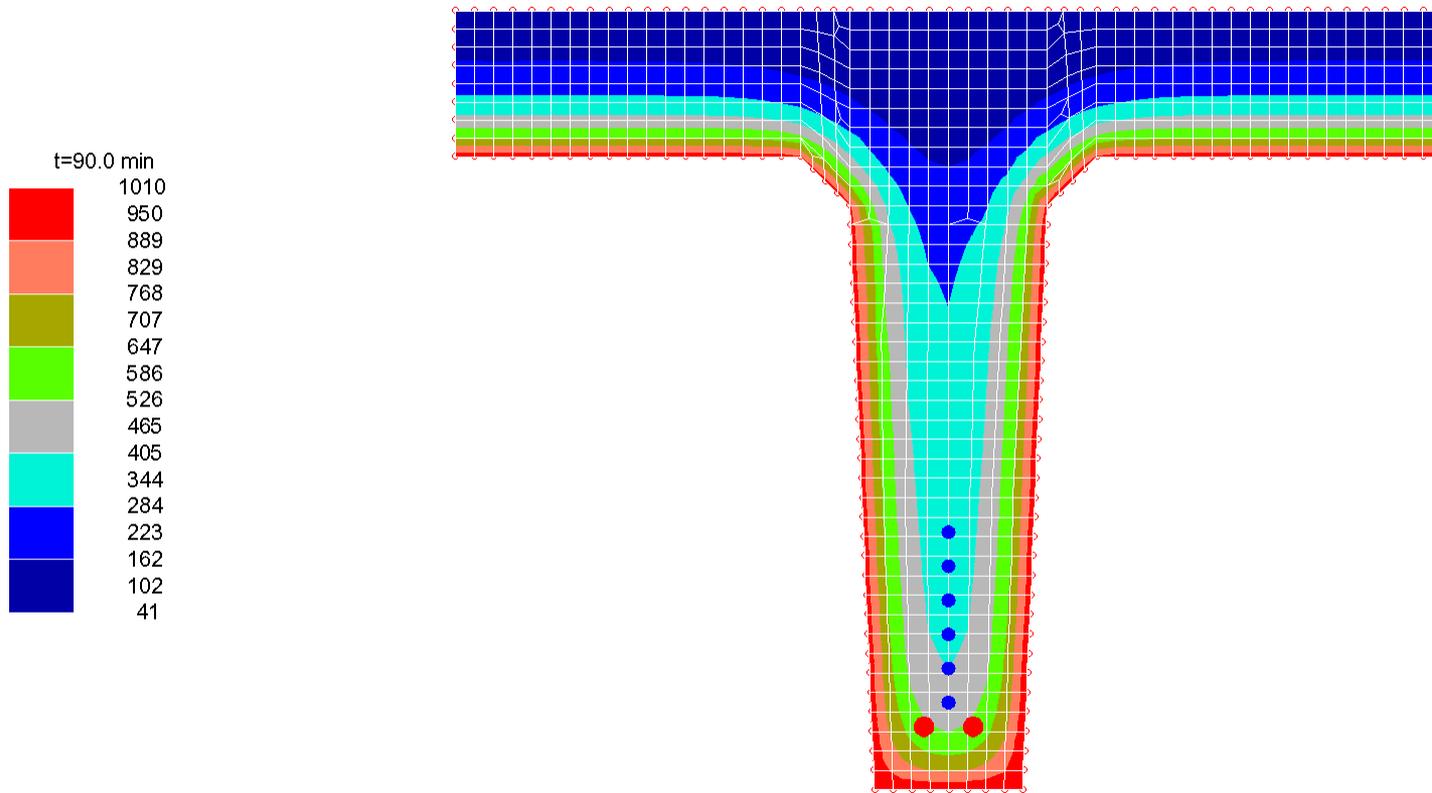
TEGOLO IN CAP

ANALISI TERMICA (t=75 min).



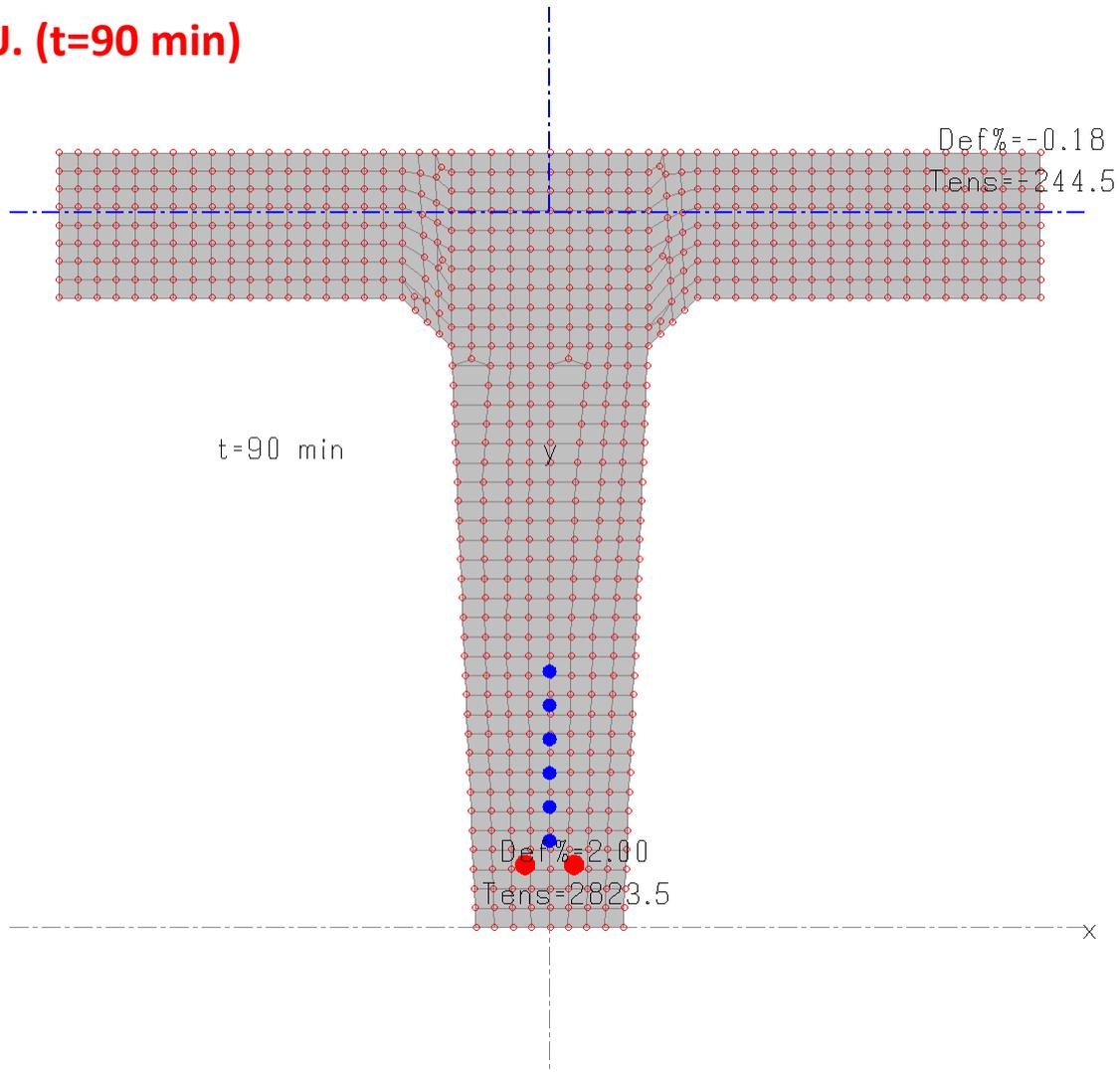
TEGOLO IN CAP

ANALISI TERMICA (t=90 min).



TEGOLO IN CAP

VERIFICA ALLO S.L.U. (t=90 min)

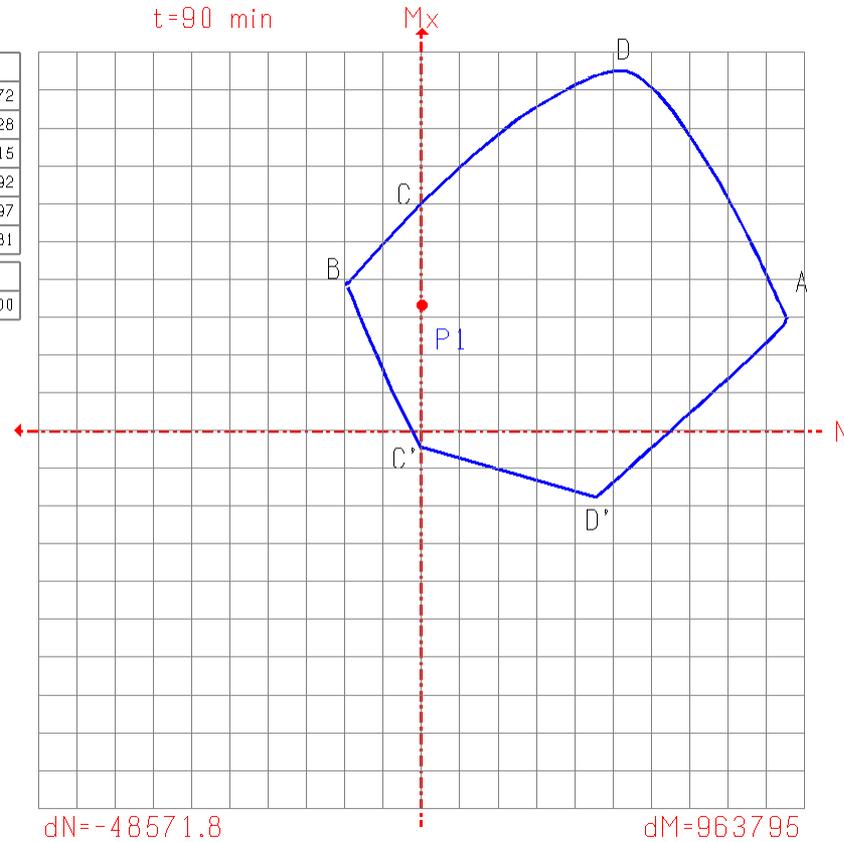


TEGOLO IN CAP

DOMINIO DI RESISTENZA ALLO S.L.U. (t=90 min)

	N	M
A	-462588	2890972
B	94902	3761228
C	0	5762115
C'	0	-424092
D	-254523	9178997
D'	-222078	-1714781

Elem	Grup	Descrizione	N	M _x
1	-		0	3180000



ESEMPI APPLICATIVI:
INTERA STRUTTURA IN ACCIAIO
SOLUZIONE ALTERNATIVA

STRUTTURA IN ACCIAIO

ISTRUZIONI TECNICHE

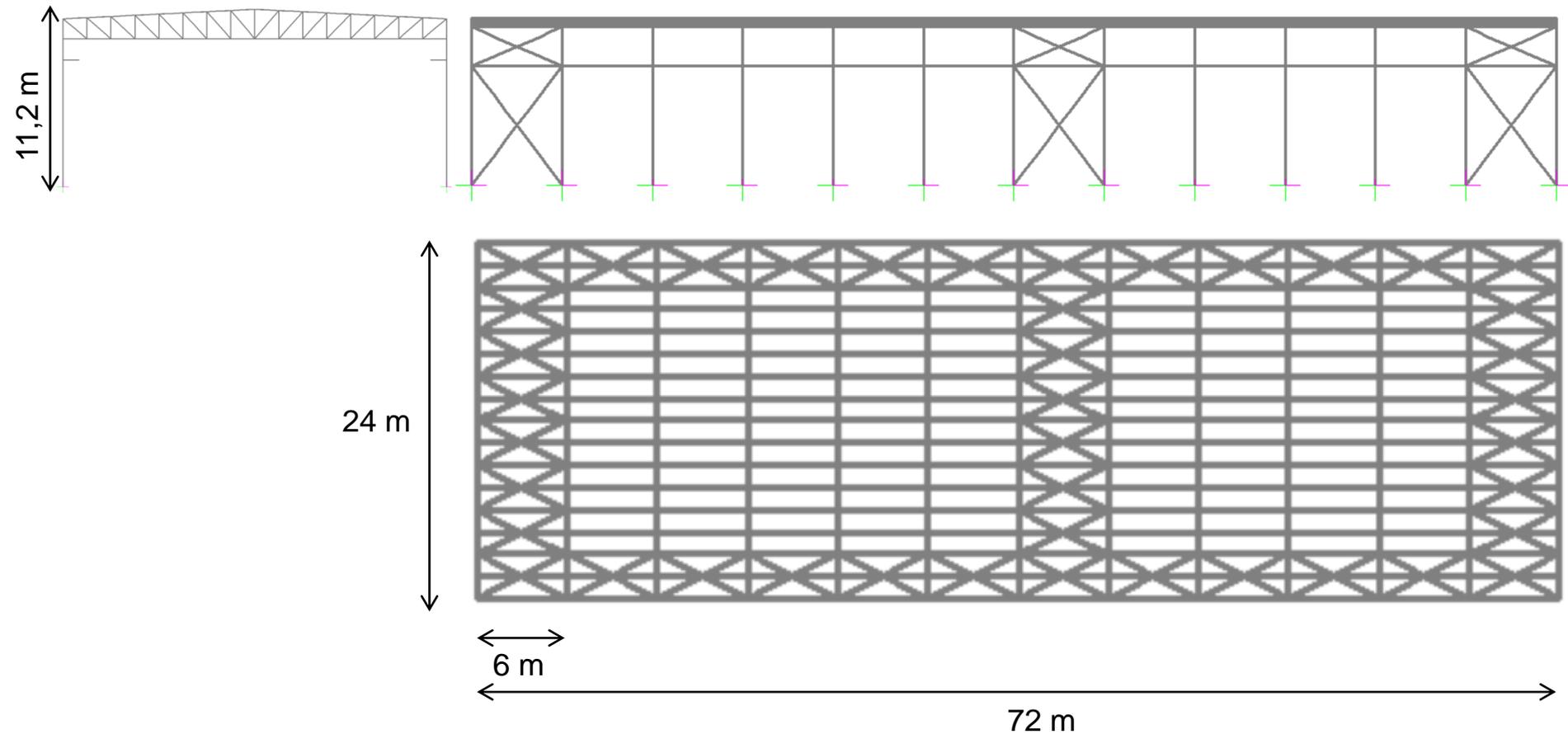
FONDAZIONE PROMOZIONE ACCIAIO – Si riporta il link per scaricarle liberamente:

<https://www.promozioneacciaio.it/cms/it7565-istruzioni-tecniche-la-sicurezza-delle-strutture-di-acciaio-in-caso-di-incendio.asp>

Documento redatto dalla Commissione Fuoco, istituita su iniziativa della Fondazione Promozione Acciaio e del CNVVF (vedasi nota DCPREV n. 13135 del 12.10.2020)

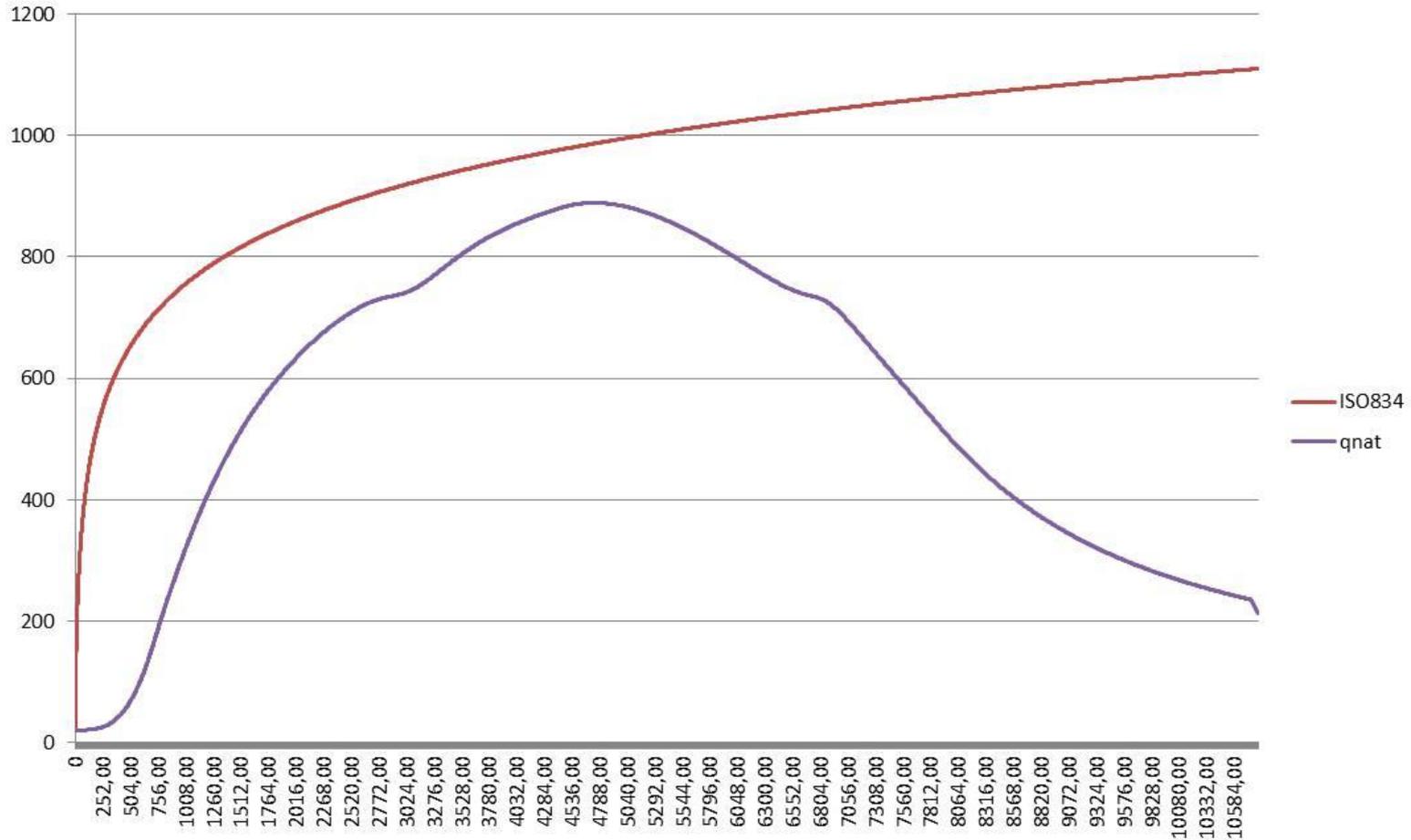
STRUTTURA IN ACCIAIO

Si fa riferimento al seguente capannone.



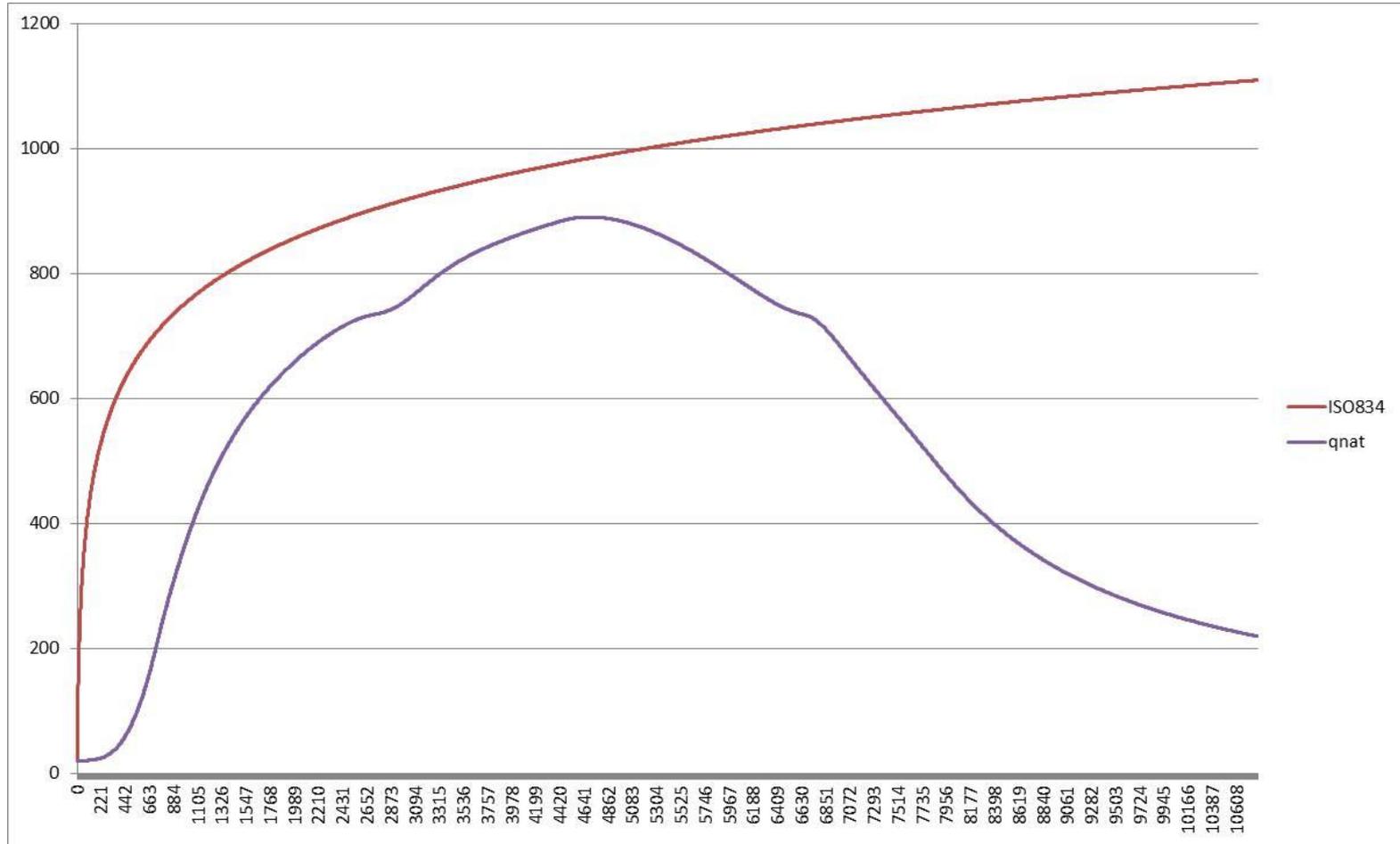
STRUTTURA IN ACCIAIO

CIMENTO TERMICO COLONNE – CONFRONTO CON CURVA NOMINALE ISO834.



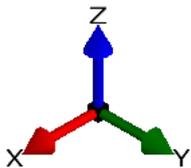
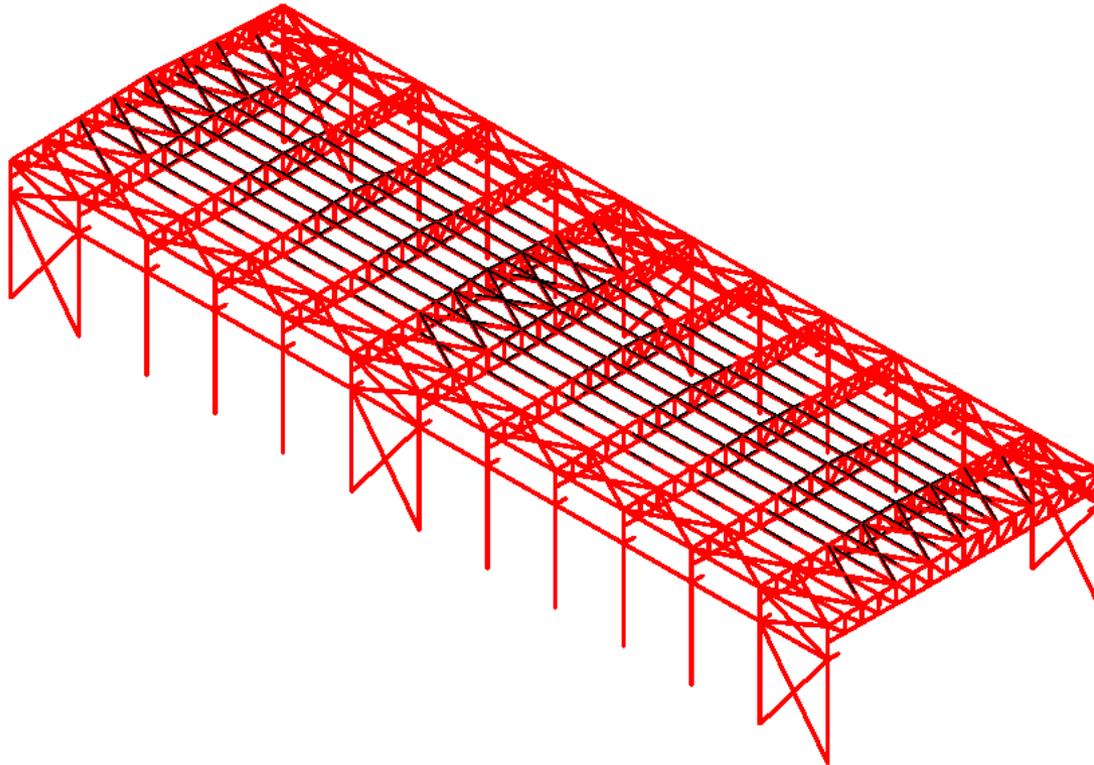
STRUTTURA IN ACCIAIO

CIMENTO TERMICO TRAVATURE – CONFRONTO CON CURVA NOMINALE ISO834.



STRUTTURA IN ACCIAIO

CALCOLO NEL DOMINIO DEL TEMPO (t=1 s).



Diamond 2016 for SAP
FILE : mod3d-discv02
NODES : 23043
BEAMS : 11259

BEAMS PLOT
DISPLACED CONFIGUR

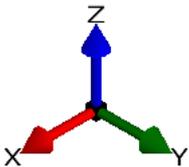
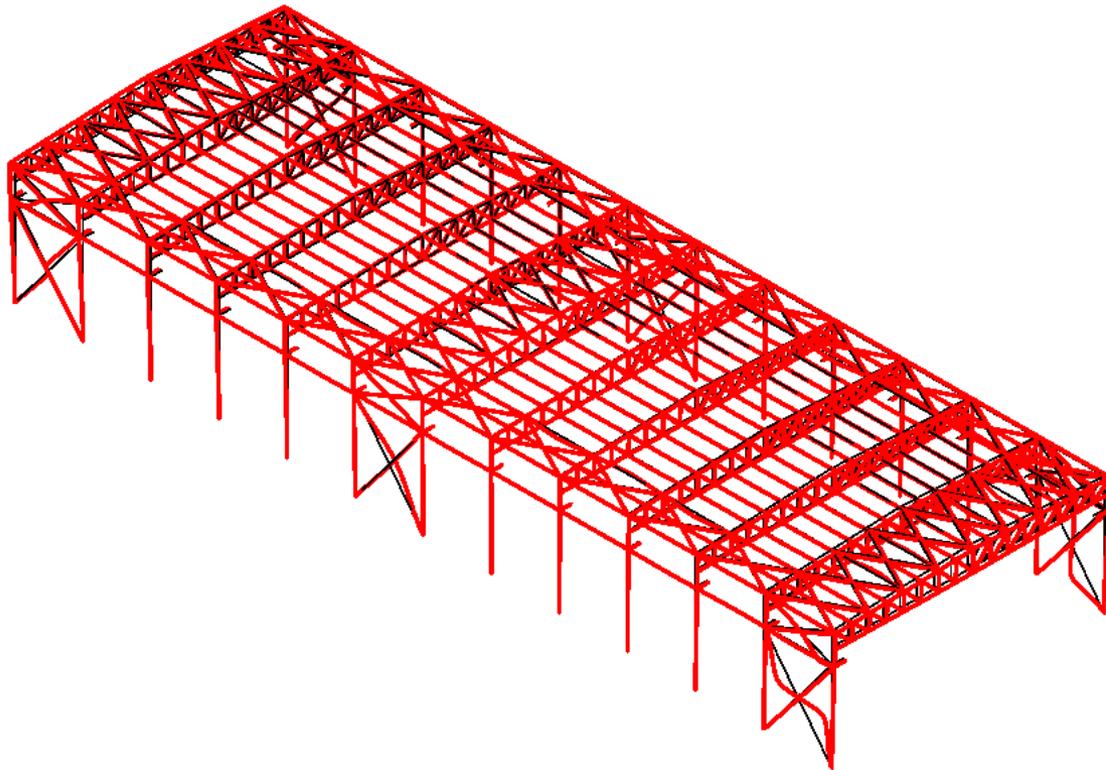
TIME : 1 sec

BEAMS :
[Red Box] Beam Elem

Legend Viewpoint Select

STRUTTURA IN ACCIAIO

CALCOLO NEL DOMINIO DEL TEMPO ($t=1000$ s).



Diamond 2016 for SAP
FILE : mod3d-discv02
NODES : 23043
BEAMS : 11259

BEAMS PLOT
DISPLACED CONFIGUR

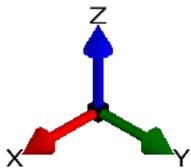
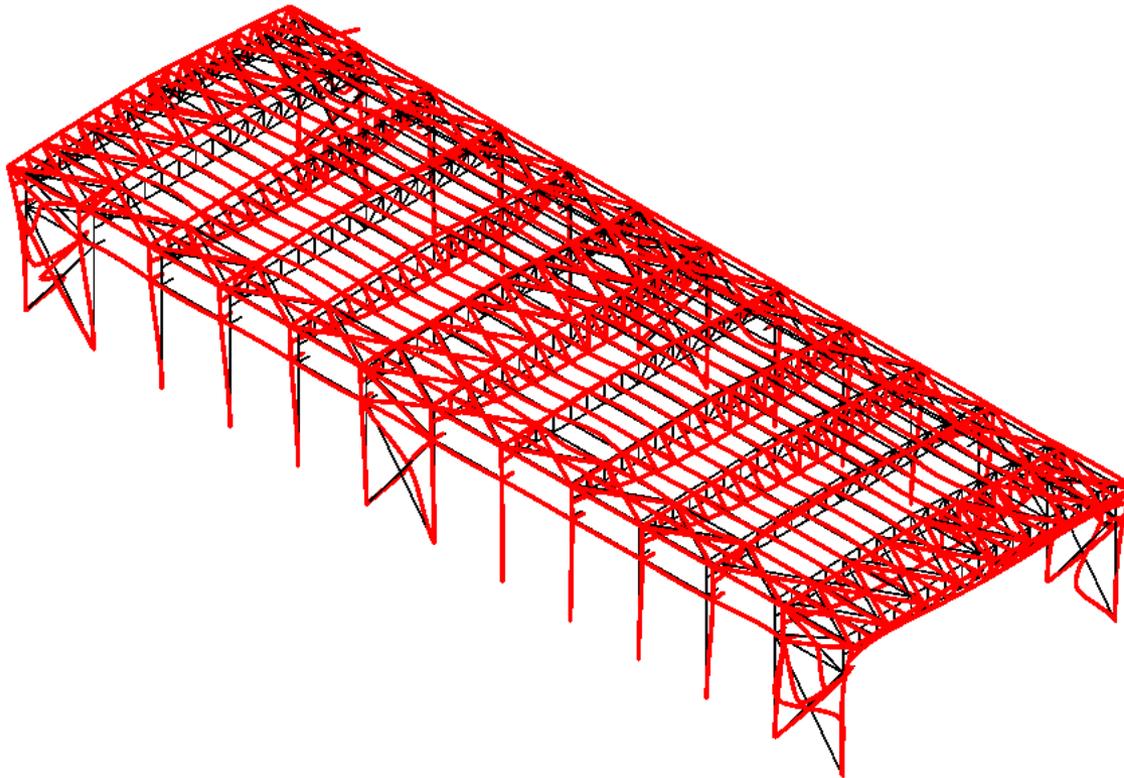
TIME : 1000.96875 sec

BEAMS :
[Red Box] Beam Elem

Legend Viewpoint Select

STRUTTURA IN ACCIAIO

CALCOLO NEL DOMINIO DEL TEMPO ($t=1600$ s).



Diamond 2016 for SAP
FILE : mod3d-discv02
NODES : 23043
BEAMS : 11259

BEAMS PLOT
DISPLACED CONFIGUR

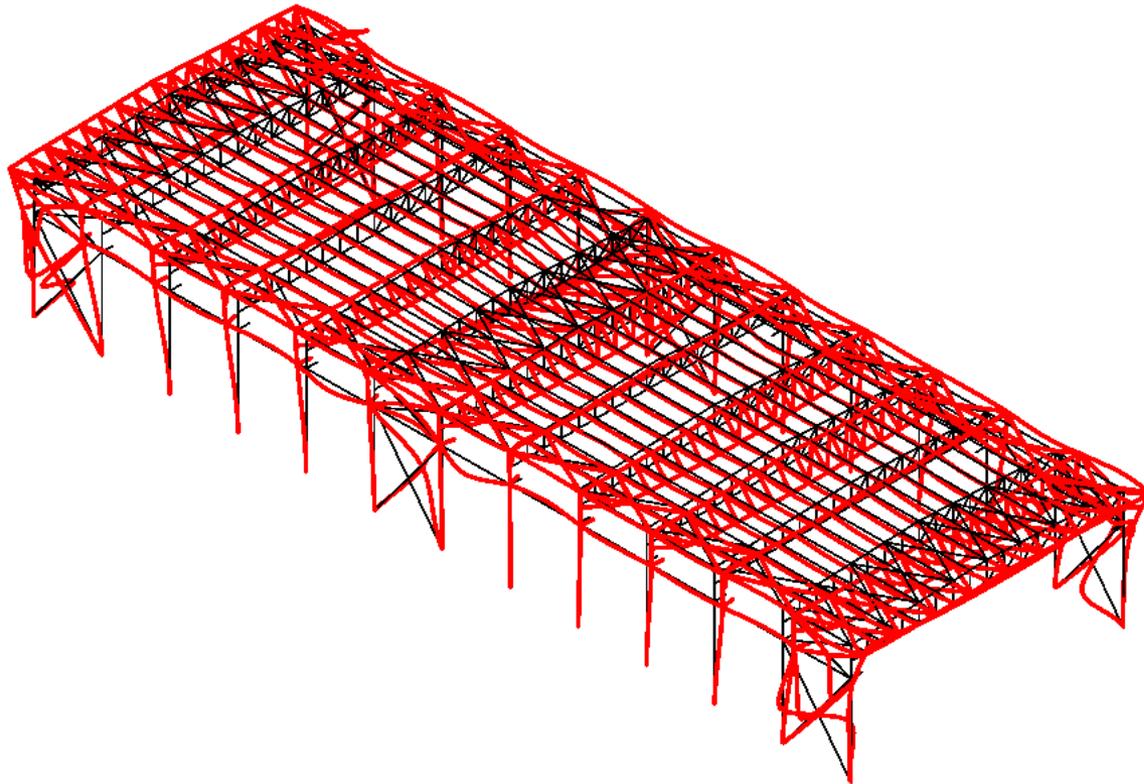
TIME : 1600.21094 sec

BEAMS :
[Red Box] Beam Elem

Legend Viewpoint Select

STRUTTURA IN ACCIAIO

CALCOLO NEL DOMINIO DEL TEMPO ($t=2310$ s = TEMPO DI COLLASSO).



Diamond 2016 for SAP
FILE : mod3d-discv02
NODES : 23043
BEAMS : 11259

BEAMS PLOT
DISPLACED CONFIGUR

TIME : 2310.98405 sec

BEAMS :
Beam Elem

Legend Viewpoint Select

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- A. H. Buchanan - "Progetto delle strutture resistenti al fuoco" – ed. Italiana HOEPLI
- B. Nigro E., Cefarelli G., Pustorino S., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio", HOEPLI
- C. Purkiss J. A., "Fire safety engineering", 3° Ed., Elsevier
- D. Drysdale D., "An introduction to fire dynamics", 2° Ed., John Wiley & Sons
- E. Karlsson B., Quintiere J. G., "Enclosure fire dynamics", CRC Press
- F. Ponticelli L., Caciolai M., "Resistenza al fuoco delle costruzioni", UTET
- G. Piazza M., Tomasi R., Modena R., "Strutture in legno", HOEPLI
- H. Gambarova P. G., Fantilli A. P., Tattoni S., "Strutture resistenti al fuoco", EPC Editore
- I. Safir, http://www.uee.uliege.be/cms/c_2383458/fr/safir
- J. Franssen J.M., Gernay T., "Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities", Journal of Structural Fire Engineering, Vol. 8 No. 3, 2017 pp. 300-323, © Emerald Publishing Limited 2040-2317
- K. Franssen, J.M., Cowez, B., Gernay, T. (2014), "Effective stress method to be used in beam finite elements to take local instabilities into account", Fire Safety Science 11, in Proc. of the 11th IAFSS Symposium, Christchurch, New Zealand, Feb 10-14, pp. 544-557
- L. Progetto LOCAFIplus: - <https://research.bauforumstahl.de/en/fire-safety/locafi-temperature-assessment-of-a-vertical-member-subjected-to-localised-fire/>
- M. Nigro E., Ferraro A., Pustorino S., Princi P., Bontempi F., Crosti C., Ponticelli L., Mastrogiuseppe C., "Progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di capannoni industriali Modellazione termo-meccanica di scenari di incendio", <http://www.promozioneacciaio.it/cms/it6756-progettazione-in-caso-di-incendio-delle-strutture-di-acciaio-di-capannoni-industriali-modellazione-termo-fluidodinamica-di-scenari-di-incendio.asp>
- N. Fantilli A. P., Vallini P., Demarchis F., "I domini di interazione di archi in muratura soggetti ad elevate temperature", atti del "workshop WONDERmasonry 2009", Lacco Ameno, Ischia, 8-10 ottobre 2009
- O. Andreini M., Sassu M., "Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action", Fire Safety Journal 46 (2011) 440-450, Elsevier
- P. Ponticelli L. ed al., "Prova di resistenza al fuoco su una volta a botte in muratura", DCPST
- Q. Crosti C., Marino A., "Analisi strutturali con Straus7 di capannoni in acciaio in condizioni di incendio", <https://www.ingenio-web.it/19536-analisi-strutturali-con-straus7-di-capannoni-in-acciaio-in-condizioni-di-incendio>
- R. Crosti C., Marino A., "Analisi strutturali di un capannone in acciaio in condizioni di incendio", Costruzioni Metalliche set/ott 2018
- S. Crosti C., Marino A., "Soluzione alternativa di resistenza al fuoco per una struttura con elementi in acciaio di classe 4", <https://www.ingenio-web.it/26657-soluzione-alternativa-di-resistenza-al-fuoco-per-una-struttura-con-elementi-in-acciaio-di-classe-4>
- T. Autori vari, "La Resistenza al Fuoco degli Elementi Strutturali - Focus sulla misura S.2 del Codice di prevenzione incendi – Resistenza al Fuoco", INAIL 2019
- U. Dell'Asta A., Landolfo R., Salvatore W., "Edifici monopiano in acciaio ad uso industriale", Flaccovio Editore
- V. Sigmund C., "Calcolo di elementi prefabbricati in cemento armato precompresso", Grafill
- W. ISTRUZIONI TECNICHE - <https://www.promozioneacciaio.it/cms/it7565-istruzioni-tecniche-la-sicurezza-delle-strutture-di-acciaio-in-caso-di-incendio.asp>
- X. Crosti C., Marino A., "Resistenza al fuoco delle strutture: corretta applicazione delle curve naturali di incendio e importanza della misura S.5 GSA", Rivista Antincendio, Luglio 2020
- Y. Autori vari del CNVVF, a cura di Dattilo F., Cavriani M., "Esempi applicativi del Codice di prevenzione incendi – II edizione", EPC editore, novembre 2020
- Z. <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/default.htm>
- AA. EN 1991-1-2 e correlate
- BB. EN 1992-1-2 e correlate
- CC. EN 1993-1-2 e correlate
- DD. EN 1994-1-2 e correlate
- EE. EN 1995-1-2 e correlate
- FF. EN 1996-1-2 e correlate
- GG. EN 1999-1-2 e correlate
- HH. D.M. 31.07.2012, "Approvazione delle Appendici nazionali recanti i parametri tecnici per l'applicazione degli Eurocodici"
- II. D.M. 3 agosto 2015 E s.m.i., "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139"

GRAZIE PER L'ATTENZIONE