

LA RESISTENZA AL FUOCO DELLE COSTRUZIONI DI ACCIAIO

ISA - Istituto Superiore Antincendi

Roma, 5 novembre 2024

I codici di calcolo per il progetto delle soluzioni progettuali della resistenza al fuoco

Prof. Ing. Nicola Tondini



CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

USO DI CODICI DI CALCOLO

L'uso dei codici di calcolo in applicazioni di resistenza al fuoco è molto diffuso:

- Analisi dell'incendio (modellazione avanzata, ad esempio CFD)
- Analisi termomeccanica (modellazione FEM di sottostrutture, struttura intera)

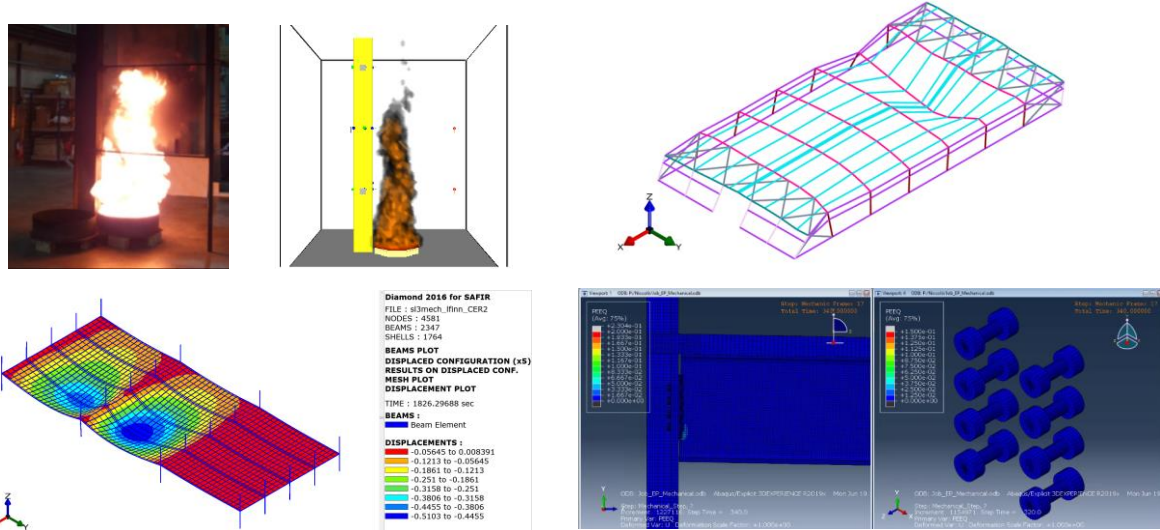
In particolare, nell'**applicazione del Fire Safety Engineering** (Soluzioni alternative) risulta in pratica un imperativo



È necessario considerare le azioni indirette che sono di difficile stima

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

ESEMPI DI USO DI CODICI DI CALCOLO

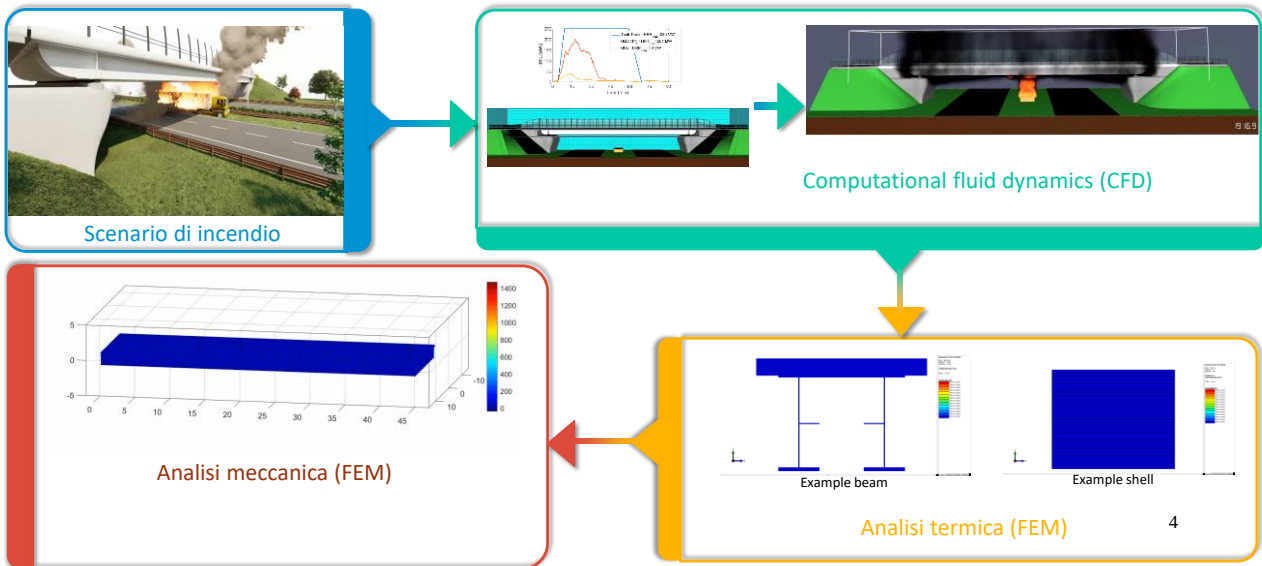


Sommavilla M., Tondini N. (2020) Fire performance of a steel open car park in the light of the recent development of the localised fire model "LOCAFI", SiF 2020, Brisbane, Australia, 30 November – 2 December.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

ESEMPI DI USO DI CODICI DI CALCOLO

Covi P., Tondini N. (2024) Probabilistic fire assessment of bridges: an Italian case study, SiF 2024, Coimbra, Portugal, 19-21 June.



CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

OUTLINE

- Requisiti generali di un modello di calcolo
- Esempi di verifica e validazione di un modello di calcolo
- Requisiti principali di un codice di calcolo per l'analisi della resistenza al fuoco di strutture in acciaio
- Esempi di analisi termomeccaniche

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

REQUISITI DI UN MODELLO DI CALCOLO

Norme Tecniche per le Costruzioni 2018

10.2. ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista, dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso la documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

REQUISITI DI UN MODELLO DI CALCOLO

Decreto Ministeriale di Prevenzione Incendi 18 ottobre 2019

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 <u>possedere una particolare competenza nel loro utilizzo, nonché un'approfondita conoscenza sia dei fondamentali teorici che ne sono alla base che della dinamica dell'incendio.</u> 3. Allo stato attuale i modelli più frequentemente utilizzati sono: a. modelli analitici, Nota Ad esempio, le correlazioni per i modelli di incendio localizzati o <i>fire plumes</i> di Zukoski, Heskestad, McCaffrey, Thomas, Hasemi e Nishiyama, Alpert, ... 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 termostrutturale. Nota Ad esempio, codici di calcolo Abaqus, Adina, Ansys, Diana, Safir, ...

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

REQUISITI DI UN MODELLO DI CALCOLO

Un modello di calcolo deve essere per quanto più possibile:

- **Verificato**

"The process of determining that a model implementation accurately represents the developer's conceptual description of the model and the solution to the model"
=> **Verifica** significa risolvere le equazioni correttamente

- **Validato**

"The process of determining the degree to which a model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of the model" => **Validazione** significa risolvere le equazioni corrette

Garbage in => Garbage out

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

REQUISITI DI UN MODELLO DI CALCOLO

Esistono dei documenti per accertare le capacità predittive di modelli di calcolo

- **ISO 16730-1:2015** Fire safety engineering — Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods
 - *a process to ensure that the equations and calculation methods are implemented correctly (verification) and that the calculation method being considered is solving the appropriate problem (validation).*
 - *requirements for documentation to demonstrate the adequacy of the scientific and technical basis of a calculation method.*
 - *requirements for data against which a calculation method's predicted results shall be checked.*
 - *guidance on use of this International Standard by developers and/or users of calculation methods, and by those assessing the results obtained by using calculation methods.*

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

REQUISITI DI UN MODELLO DI CALCOLO

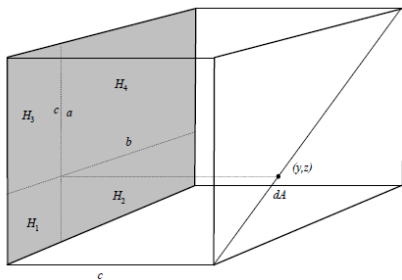
- **ISO/TR 16730-2:2013** Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods **Part 2: Example of a fire zone model**
- **ISO/TR 16730-3:2013** Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods **Part 3: Example of a CFD model**
- **ISO/TR 16730-4:2013** Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods **Part 4: Example of a structural model**
- **ISO/TR 16730-5:2013** Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods **Part 5: Example of an egress model**
- **ASTM E1355-12** Standard guide for evaluating the predictive capability of deterministic fire models (Le guide di FDS si basano questo documento)

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

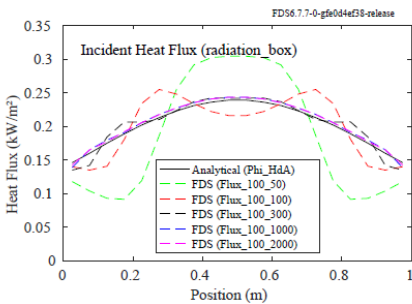
ESEMPIO DI VERIFICA DI UN MODELLO DI CALCOLO

Irraggiamento all'interno di un volume (FDS)

Fattori di vista lungo la diagonale, 100³ celle e differente n di angoli di irraggiamento



(y, z)	Φ_{HdA}	(y, z)	Φ_{HdA}
0.025	0.1457	0.275	0.2135
0.075	0.1603	0.325	0.2233
0.125	0.1748	0.375	0.2311
0.175	0.1888	0.425	0.2364
0.225	0.2018	0.475	0.2391

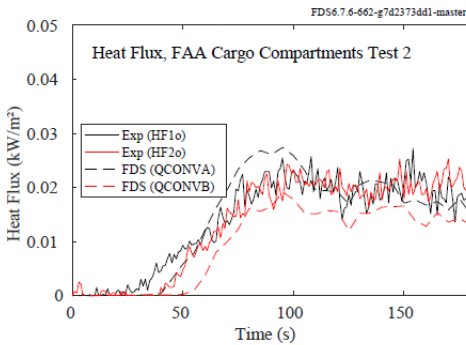
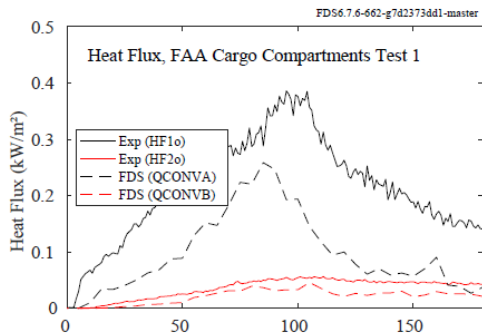


NIST (2021) Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification, NIST Special Publication 1018-2.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

ESEMPIO DI VALIDAZIONE DI UN MODELLO DI CALCOLO

Misura del flusso termico al soffitto (FDS)



NIST (2021) Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Validation, NIST Special Publication 1018-3.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

VERIFICA & VALIDAZIONE DI UN MODELLO DI CALCOLO

Fire Dynamics Simulator

NIST Special Publication 1018-2
Sixth Edition

Fire Dynamics Simulator
Technical Reference Guide
Volume 2: Verification

Kevin McGrattan
Simo Hostikka
Jason Floyd
Randall McDermott
Marcos Vanella

NIST Special Publication 1018-3
Sixth Edition

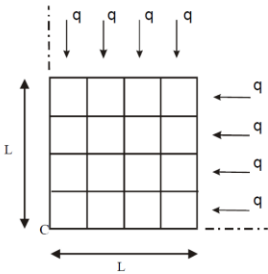
Fire Dynamics Simulator
Technical Reference Guide
Volume 3: Validation

Kevin McGrattan
Simo Hostikka
Jason Floyd
Randall McDermott
Marcos Vanella

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

ESEMPIO DI VERIFICA DI UN MODELLO DI CALCOLO

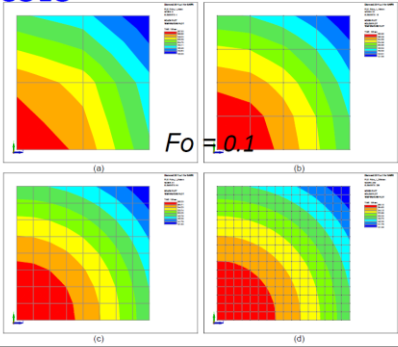
Conduzione termica 2D



$q = h (T_g - T_s)$ flusso termico
 $Fo = \alpha t / L^2$ t adimensionale
 α diffusività termica

Soluzione di riferimento

Fo	T [°C]
0.0	1000.0
0.1	986.4
0.2	903.8
0.4	690.2
0.6	514.7
0.8	382.7
1.0	284.5

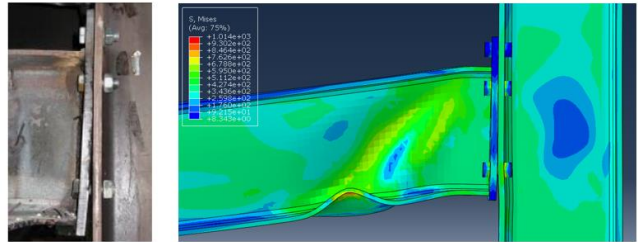
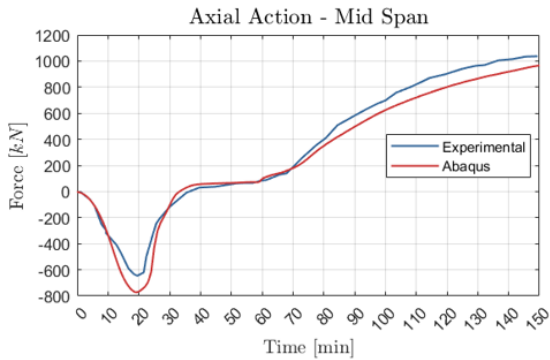


	4 Elements		16 Elements		64 Elements		256 Elements	
Fo	T [°C]	Δ [°C]	T [°C]	Δ [°C]	T [°C]	Δ [°C]	T [°C]	Δ [°C]
0.1	1021.0	34.6	994.0	7.6	988.1	1.7	986.7	0.3
0.2	937.1	33.3	912.0	8.2	905.8	2.0	904.2	0.4
0.4	707.3	17.1	694.7	4.5	691.6	1.4	690.8	0.6
0.6	524.2	9.5	517.4	2.7	515.7	1.0	515.2	0.5
0.8	388.1	5.4	384.4	1.7	383.5	0.8	383.3	0.6
1.0	287.3	2.8	285.6	1.1	285.2	0.7	285.1	0.6

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

ESEMPIO DI VALIDAZIONE DI UN MODELLO DI CALCOLO

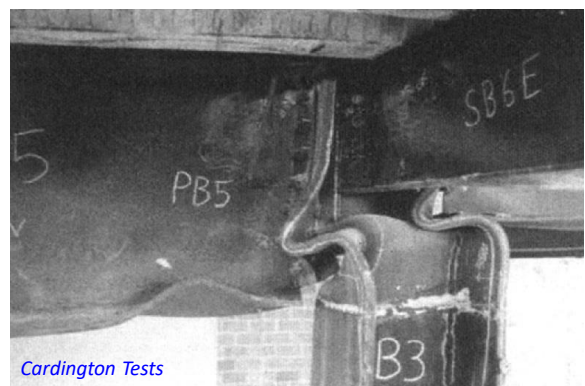
Giunto in acciaio a piastra saldata



Passarini N., Tondini N. (2024) Behaviour of simple steel joints under natural fire curves: a case study, SiF 2024, Coimbra, Portugal, 19-21 June.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

L'ANALISI DEL COMPORTAMENTO AL FUOCO DI STRUTTURE IN ACCIAIO



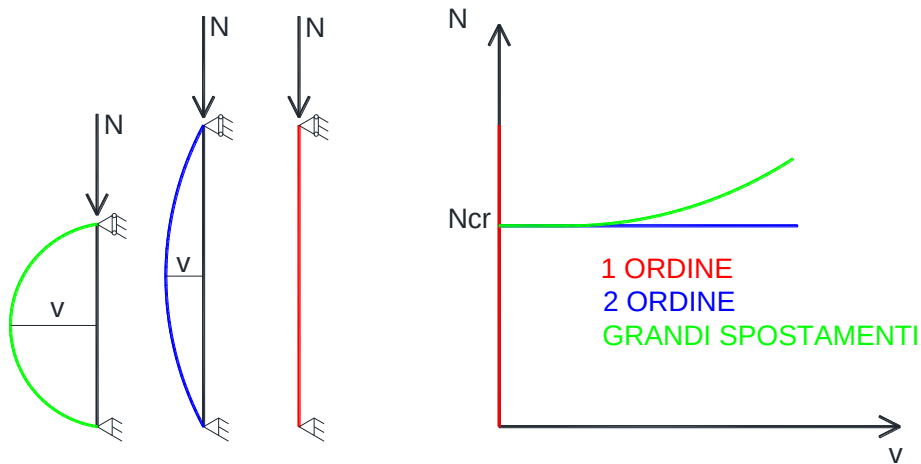
Il modello di calcolo deve essere in grado di cogliere le **non linearità**:

- Geometrica
- Meccanica

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ GEOMETRICA

Esempio: Analisi elastica di un'asta senza imperfezioni



CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ GEOMETRICA

Per analisi di telai è importante riuscire a descrivere le **grandi rotazioni**

Per descrivere la **cinematica di elementi finiti geometricamente non lineari** sono attualmente in uso **tre formulazioni**:

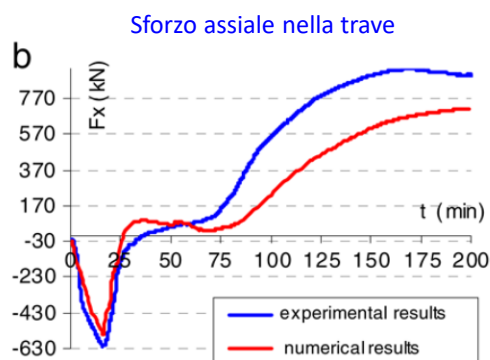
- **Total Lagrangian (TL)**
- **Updated Lagrangian (UL)**
- **Corotational (CR)**

Differiscono per la scelta della configurazione di riferimento

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ GEOMETRICA

Esempio: Trave con dilatazione termica impedita assialmente

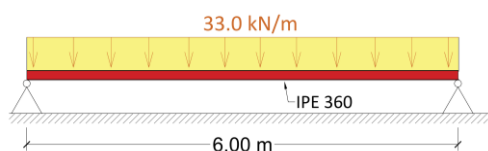


Santiago A, Silva L, Vila Real P, Vaz G, Gameiro Lopes A, Experimental evaluation of the influence of connection typology on the behavior of steel structures under fire. *Engineering Journal*, 46, 2008.

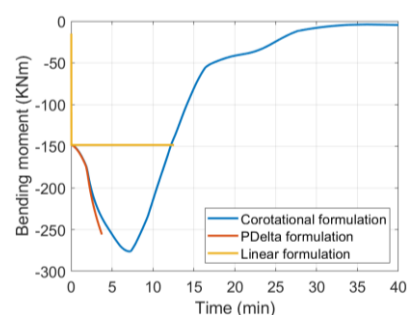
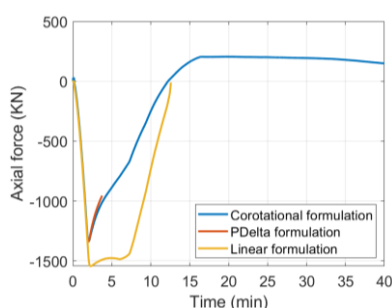
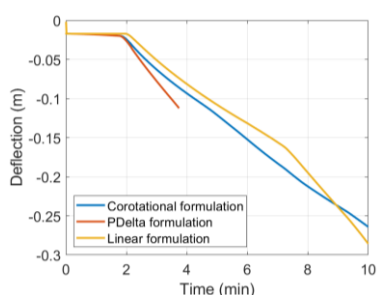
CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ GEOMETRICA

Esempio: Trave con dilatazione termica impedita assialmente



- ISO 834 su 4 lati
- Acciaio S355



CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ GEOMETRICA

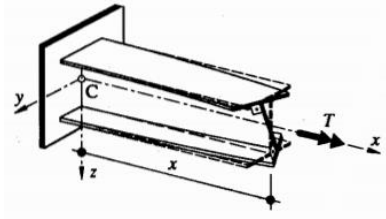
Profili sottili aperti richiedono un'accurata descrizione della **torsione non uniforme** per cogliere, per esempio, problemi di instabilità latero-torsionale.

Elementi finiti di tipo trave con 7 gradi di libertà

Vettore di spostamento globale

$$\mathbf{p}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^{gT} \bar{\mathbf{g}}_1^{gT} \alpha_1 & \mathbf{u}_2^{gT} \bar{\mathbf{g}}_2^{gT} \alpha_2 \end{bmatrix}$$

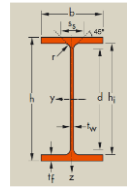
α parametro di ingobbamento



$$I_\omega = \int_A \omega^2 dA \quad \text{momento d'inerzia settoriale}$$

$$I_\omega = \frac{t_f (h - t_f) b^3}{24}$$

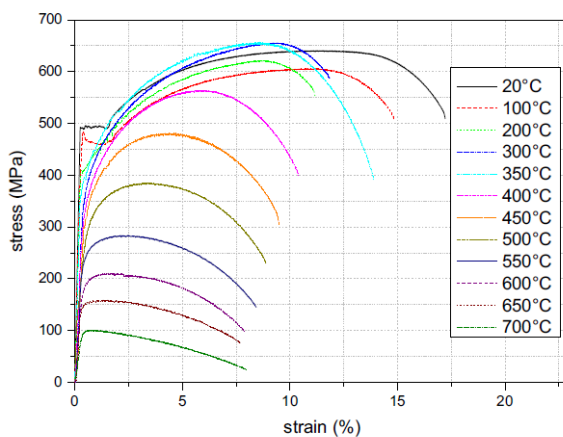
$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 G I_T}{\pi^2 E I_z}}$$



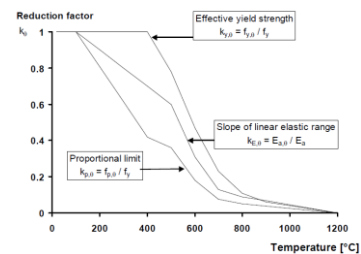
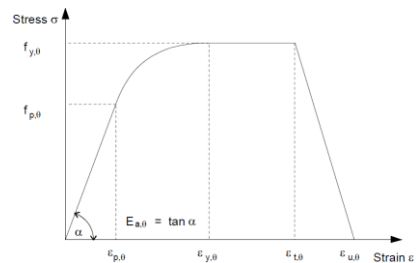
CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ MECCANICA

Comportamento dell'acciaio ad alta temperatura



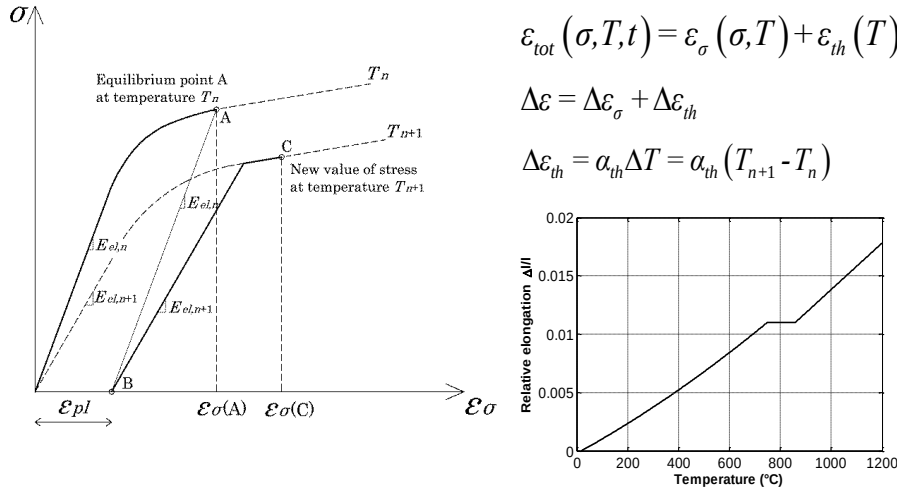
European Committee for Standardisation, Eurocode 3 Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, 2005.



CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ MECCANICA

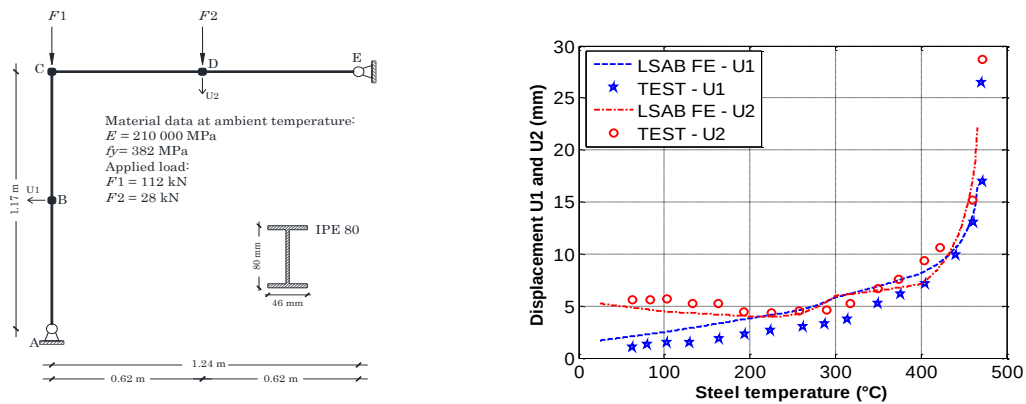
Esempio: Integrazione del legame costitutivo uniassiale - Elemento finito Bernoulli



CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ MECCANICA

Esempio: Esempio di confronto tra analisi numerica e sperimentale

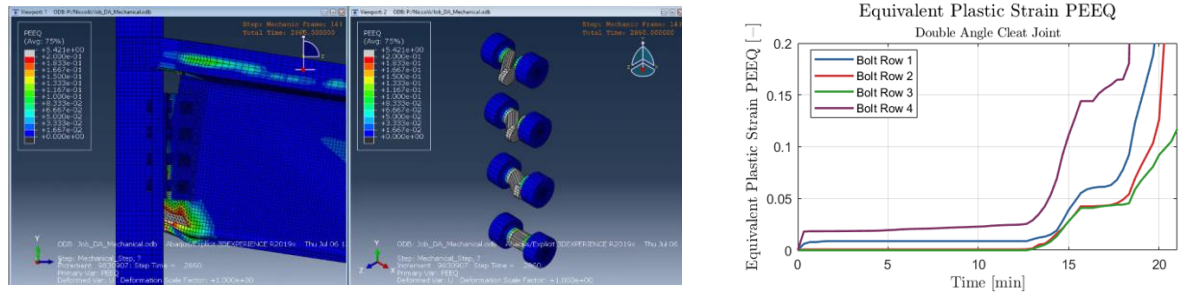


Morbioli A., Tondini N., Battini J.-M. (2018) A branch-switching procedure for analysing instability of steel structures subjected to fire, *Structural Engineering and Mechanics*, 67(6):629-641.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

NON LINEARITÀ MECCANICA

Modelli di calcolo di giunti in acciaio devono cogliere problemi di contatto

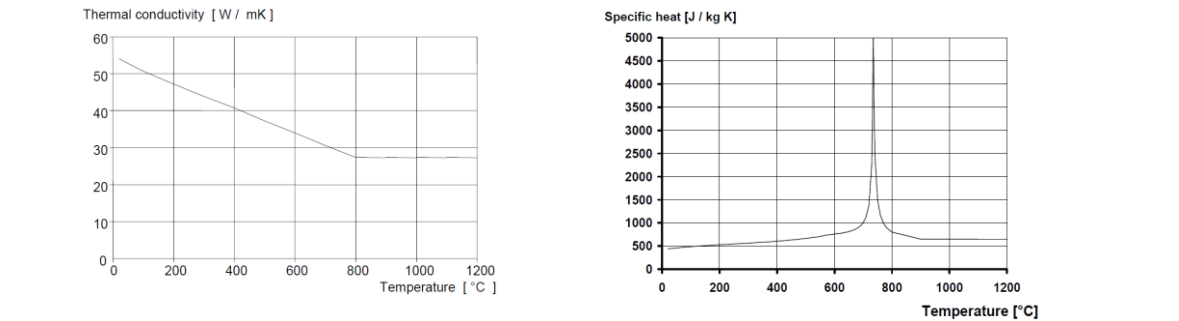


Passarini N., Tondini N. (2024) Behaviour of simple steel joints under natural fire curves: a case study, Proceedings of 13th International Conference on Structures in Fire (SiF 2024), Coimbra, Portugal, 19-21 June.

CODICI DI CALCOLO PER LA RESISTENZA AL FUOCO

ANALISI TERMICA

È opportuno che il modello di calcolo sia in grado di implementare le proprietà termiche dell'acciaio fornite dall'EN 1993-1-2



European Committee for Standardisation, Eurocode 3 Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, 2005.

CONCLUSIONI

- Il codice di calcolo deve essere corredato da una **documentazione che certifica la sua verifica e validazione** prodotta dallo sviluppatore.
- Fondamentale per **ben descrivere il comportamento al fuoco di strutture in acciaio** è la capacità del modello di calcolo di cogliere la **non linearità geometrica e meccanica**.



**Grazie per l'attenzione!
Domande?**