

STRUCTURAL

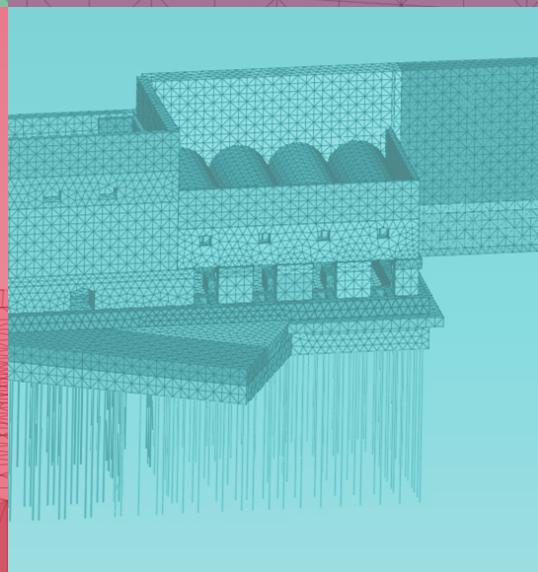
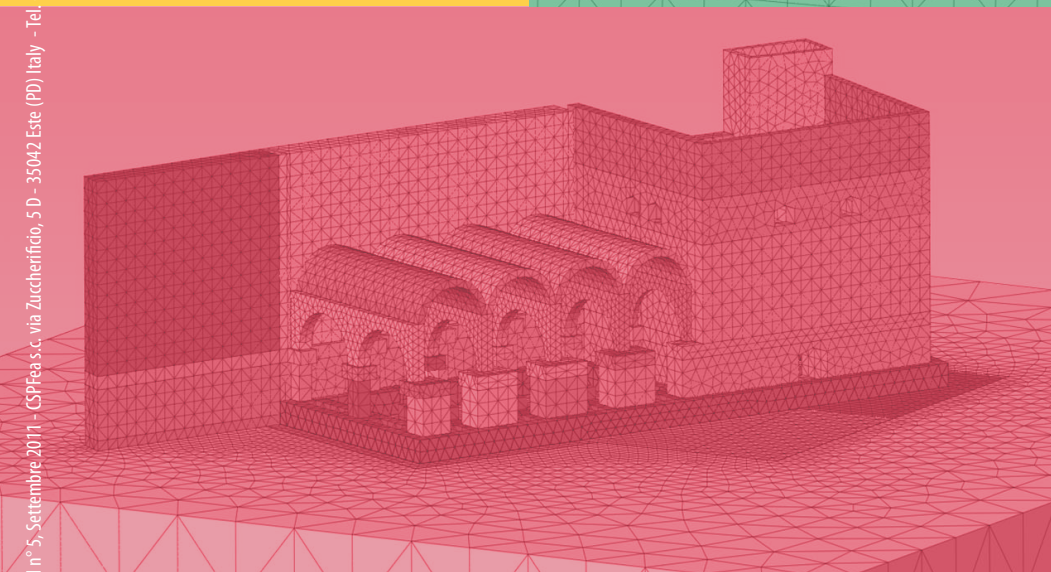
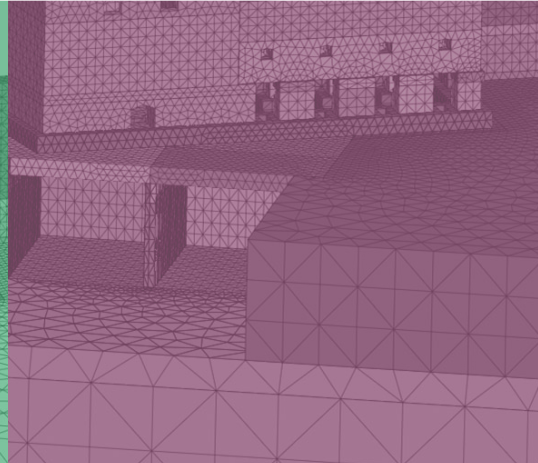
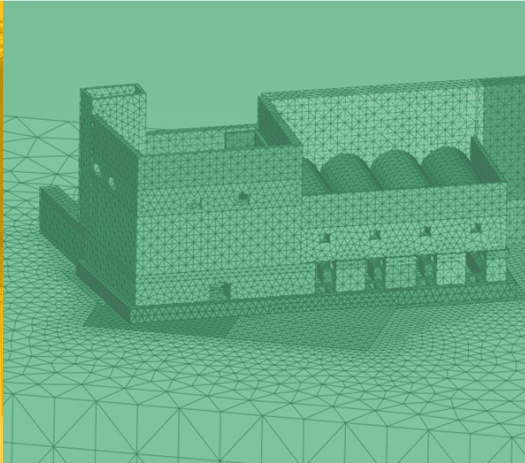
5

magazine di ingegneria strutturale

www.structural-modeling.it

numero cinque

M O D E L I N G



INFRASTRUTTURE
Stazione TAV di Afragola
di Zaha Hadid



BENCHMARK
L'analisi di elementi in
calcestruzzo armato
in fase fessurata



VALIDAZIONE
La Validazione e la
Verifica dei modelli
di calcolo strutturale



0,000 5,261 10,521 15,782

0,000 8,792

2



Ing. Paolo Segala
Direttore Responsabile e CEO di CSPFea s.c.

Il futuro alle porte: nuove opportunità per gli strutturisti

In questi mesi ho potuto toccare con mano gli sviluppi delle maggiori Case di Software, a cominciare da MIDAS, ma anche di startup che stanno diffondendo nuovi metodi numerici per affrontare con maggiore semplicità i casi di calcolo sempre più complessi richiesti dall'industria delle costruzioni. Posso certamente dire che il futuro è alle porte, ed è un futuro dove le prestazioni dei lavori di ingegneria sono affrontabili nella loro reale complessità anche da professionisti ben preparati, ma non necessariamente da accademici dedicati totalmente alla ricerca avanzata. MIDAS è in procinto di rilasciare sul mercato europeo il nuovo prodotto CAE, MIDAS/NFX, un FEM per il calcolo in ambito dell'ingegneria meccanica. È da questo prodotto, il più nuovo, che si traggono informazioni su come diventeranno, a breve, i nostri software di calcolo strutturale civile: prodotti come MIDAS/Gen e MIDAS/Civil non saranno integrati in CAD per avere un BIM di tipo "push button", ma piuttosto una piattaforma avanzata di calcolo dove l'ingegnere calcolatore potrà dialogare con gli altri software della catena BIM in maniera "bidirezionale", senza essere legato ad un prodotto specifico. E sarà possibile diversificare l'utilizzo: MIDAS/NFX infatti viene proposto in versione "Analyst", avanzata, e in versione "Designer", estremamente produttiva per le progettazioni più ordinarie. Tra quanto troveremo tutto questo anche nei prodotti di ingegneria civile? Molto presto, un assaggio infatti è il lancio, nei mercati di test (asiatici), di MIDAS/eGen, il prodotto di calcolo estremamente produttivo inteso per progettazioni "ordinarie", che in Asia si declina con edifici fino a 20 piani. Ma lo stesso DIANA, sta riprogettando completamente l'interfaccia sul proprio potentissimo "core" di analisi, ed entro un anno questo software di analisi, leader mondiale nei campi del progetto di complesse infrastrutture, diventerà un software leader anche nel design, grazie alla rinnovata produttività. Infine un prodotto che permetta di avvicinarsi in maniera pratica ma affidabile al performance based design, specie nei settori del collasso progressivo, delle demolizioni controllate, della robustezza strutturale ad eventi accidentali quali urti ed esplosioni. Un settore in forte espansione dove certamente lo strutturista italiano troverà significative opportunità di business, soprattutto con scarsa concorrenza: spero di potervi presentare questa soluzione nel prossimo numero di Structural Modeling. Tutto questo non fa che aumentare la necessità del controllo delle analisi svolte con questi potenti strumenti di calcolo. Non saranno certamente pochi "casi prova" presentati dagli sviluppatori di software a permettere di certificare il lavoro svolto dallo strutturista. Noi di CSPFea abbiamo intrapreso con decisione la strada della Validazione dei Modelli di Calcolo, come metodo di verifica del lavoro di calcolo condivisa da NAFEMS, l'ente più prestigioso a livello mondiale sui temi del calcolo numerico, del quale siamo ora Soci. Infatti, se da un lato il produttore serio, come DIANA, esegue costantemente migliaia di casi prova su ogni release del proprio software (e MIDAS analogamente svolge questi cosiddetti "regression tests"), statisticamente ben più significativi di pochi casi prova, è necessario proseguire sulla strada della redazione di "buone pratiche" o "linee guida" per la corretta Validazione e Verifica dei Modelli di Calcolo. In un recente colloquio con i vertici del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ho potuto toccare con mano una convergenza di opinioni su tali temi. Sono rimasto colpito dalla capacità di cogliere i problemi reali di affrontare la progettazione strutturale, nella complessità dell'approccio agli Stati Limite, e il focus sul controllo dei risultati derivanti dalla complessità dei codici di calcolo. Ne parleremo con loro durante il Convegno al MADE Expo di Milano il giorno 7 Ottobre 2011, siete tutti invitati a partecipare, sperando di poter dare non solo una serie di referenziate opinioni, ma indicazioni di pratico utilizzo da parte della comunità degli strutturisti. È per tale motivo che in questo numero ospitiamo un intervento che mi pare esemplare di "buone pratiche". Il lavoro svolto dall'ing. Giussani, che verifica il codice di calcolo MIDAS/FEA per una semplice trave isostatica, comparando i risultati numerici con quelli teorici e valutando la prestazione dei vari tipi di mesh ed elementi finiti utilizzati.

Paolo Segala

Direttore Responsabile e CEO di CSPFea s.c.
direttore@structural-modeling.it

3 infrastrutture

**Stazione TAV di Afragola di Zaha Hadid.
Progetto Esecutivo Impalcati in CAP**
Ing. Giampiero Martuscelli

6 benchmark

**L'analisi di elementi in calcestruzzo armato
in fase fessurata**
Ing. Francesca Giussani, Prof. Franco Mola

12 validazione

**La Validazione e la Verifica dei modelli
di calcolo strutturale: gli standard internazionali
e le procedure dei produttori software.**
Ing. Paolo Segala

15 news ed eventi

**Fiera Bologna "SAIE 2011"
Fiera Milano Rho "MADE Expo 2011"**

magazine di ingegneria strutturale
www.structural-modeling.it

Le opinioni espresse negli articoli pubblicati dalla rivista Structural Modeling, impegnano esclusivamente i rispettivi autori.

Editore: casa editrice Il Prato - www.ilprato.com
Progetto grafico: ADV solutions - www.adv-solutions.it
© casa editrice Il Prato © CSPFea s.c.

CSPFea

www.cspfea.net · www.csp-academy.net



CSPFea distribuisce:



Stazione TAV di Afragola di Zaha Hadid.

Progetto Esecutivo Impalcati in CAP

Introduzione

Interprogetti si è occupata della variante al progetto definitivo della stazione dell'Alta Velocità di Afragola redatta in seguito alla sopraggiunta necessità di modificare le sequenze costruttive previste dal progetto originario al fine di consentire la piena operatività dei binari ferroviari nel corso dei lavori. Nello specifico la variante interessava gli impalcati parzialmente prefabbricati in c.a.p. Il presente articolo descrive le peculiarità della modellazione strutturale finalizzata all'analisi ed alla progettazione degli impalcati prefabbricati. Il software di calcolo utilizzato è Midas Gen 2008 V 7 2 1 prodotto da Midas Information Technology Co, Ltd (Corea). La progettazione, completata nell'ottobre 2008, è stata condotta in accordo con le prescrizioni del DM 1996.

Il progetto

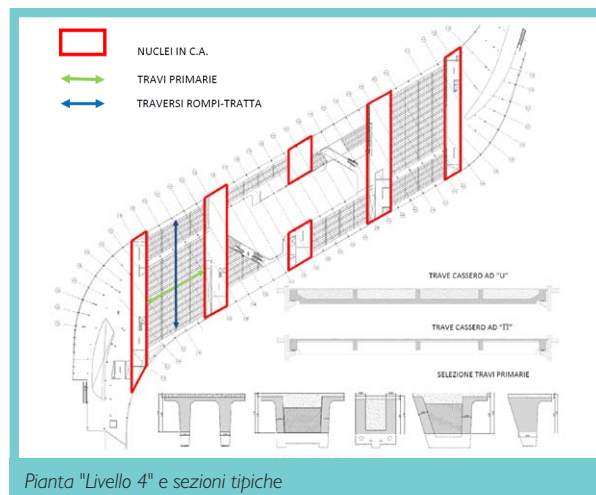
La stazione dell'Alta Velocità di Afragola presenta una singolare geometria a ponte che si sviluppa al di sopra di quattro allineamenti ferroviari, secondo una direttrice inclinata rispetto all'asse dei binari. In corrispondenza delle testate, il sistema strutturale è del tipo in c.a. in opera con solette e pareti dalla geometria complessa come da schema architettonico.



La parte centrale, invece, è una struttura parzialmente prefabbricata, appositamente studiata per garantire la funzionalità della linea ferroviaria durante lo svolgimento delle attività di cantiere. I nuclei in c.a. posti in corrispondenza delle banchine, che ospitano i collegamenti verticali, svolgono la duplice funzione di sistema sismo-resistente e di supporto intermedio per la struttura a ponte che risulta così suddivisa in 4 campi per una lunghezza complessiva di circa 145 m. Il corpo a ponte si sviluppa su 3 livelli ciascuno dei quali, realizzato in c.a.p., si caratterizza per il complesso layout che in pianta delimita un grande atrio centrale a tripla altezza, illuminato dalla copertura in acciaio e vetro.

Gli impalcati sono realizzati con travi composite di cui la parte prefabbricata è di classe Rck 55, mentre il getto di completamento è di classe Rck 45. Le sezioni prefabbricate correnti dei tegoli, sono del tipo a "II" preteso e sono presenti in corrispondenza delle aree regolari e prive di vuoti. Invece, in adiacenza ai vuoti per il passaggio di ascensori e scale mobili, sono previste travi più robuste, sempre in c.a.p. di sezione rettangolare, la cui configurazione definitiva viene realizzata per fasi: le travi prefabbricate e pretese con tipica forma ad "U", portano inizialmente i soli carichi da peso proprio e da costruzione; successivamente le stesse travi fungono da cassero per un getto di completamento seguito da un'ulteriore fase di post-tensione in direzione longitudinale. Viene così a configurarsi una sezione composita rettangolare, successivamente resa solidale alle travi adiacenti grazie alla tesatura di cavi posti in direzione trasversale. Questi ultimi, quindi, conferiscono comportamento pressoché monolitico alle

diverse travi composite affiancate che risultano così in grado di portare i carichi trasferiti dalle aree di impalcato forate ad esse adiacenti e successivamente realizzate. I traversi post-tesi sono chiamati a svolgere una duplice funzione: irrigidire trasversalmente l'impalcato e conferire ad esso un comportamento a graticcio rispetto ai carichi verticali. La luce netta delle travi è di 29m mentre l'altezza strutturale netta delle sezioni in c.a. è pari a 1.4m.



Pianta "Livello 4" e sezioni tipiche

Le travi poggiano su elementi a mensola in aggetto dalle pareti dei nuclei in c.a. e sono rastremate in corrispondenza delle estremità. Gli apparecchi d'appoggio sono del tipo ad elastomero confinato unidirezionale e multi direzionale. La disposizione in pianta è stata definita in modo da lasciare gli impalcati liberi di deformarsi in direzione longitudinale, rendendo i singoli nuclei indipendenti lungo tale direttrice, e da vincolarli in direzione trasversale, consentendo così un collegamento rigido tra gli impalcati ed i nuclei stessi. Si evidenzia che il fissaggio definitivo degli apparecchi d'appoggio avvenga solo in seguito al completamento delle fasi di post-tensione per evitare sollecitazioni parassite negli apparecchi stessi e per garantire che tutte le sollecitazioni fornite siano trasferite agli elementi da pre-comprimere. La soluzione adottata per la distribuzione degli appoggi ha permesso di affrontare in modo indipendente la progettazione e la modellazione dei singoli campi di impalcato. Fondamentale ai fini del corretto dimensionamento e della verifica degli impalcati è risultata l'individuazione delle diverse fasi costruttive con le relative condizioni di carico e di vincolo. Esse sono di seguito sintetizzate e si evidenzia come per ciascuna fase sia stata individuata una durata minima ed una massima, entrambe utilizzate per determinare gli effetti più gravosi sul sistema strutturale complessivo.

Modellazione

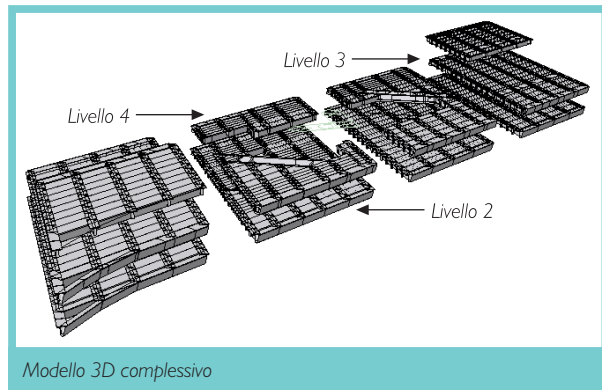
La progettazione ha previsto la predisposizione di un modello iniziale complessivo dei tre livelli di impalcato utilizzato per effettuare un pre-dimensionamento dei singoli elementi sulla base delle condizioni di carico di lungo termine. Sono stati poi realizzati dei modelli parziali, rappresentativi di singoli campi d'impalcato, sui quali sono state effettuate le analisi di dettaglio, per fasi, nonché le verifiche puntuali dei diversi elementi strutturali.

Il modello utilizzato è del tipo a graticcio obliquo, in cui in una direzione sono ordinate le travi principali vincolate alle due estremità e nell'altra direzione sono presenti i traversi di ripartizione.

Di seguito si farà riferimento ad uno dei modelli adottati tra quelli maggiormente rappresentativi delle problematiche incontrate nella progettazione.

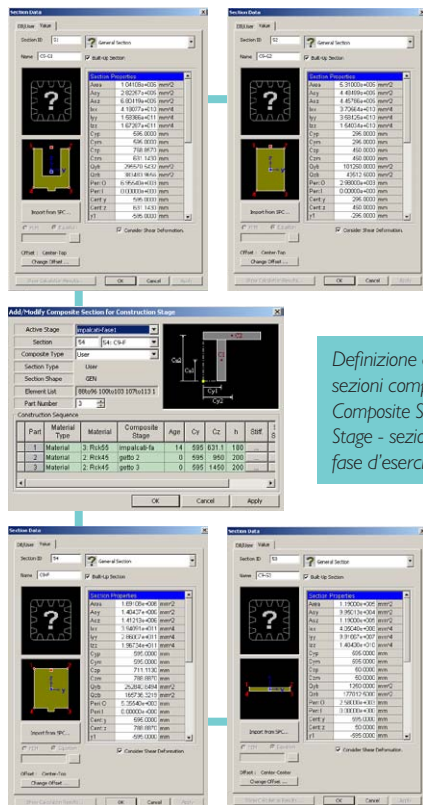
Tabella 1: Fasi costruttive relative durate

Fase	Denominazione	Descrizione	Durata min.	Durata max.
1	Impalcati fase 1	Posa in opera dei tegoli e delle travi cassero in corrispondenza delle zone adiacenti alle aree forate; prima tesatura dei cavi di post-tensione nei traversi	45g	180g
2	getto 2	Riempimento delle travi cassero con calcestruzzo di classe Rck45, all'eggerito	7g	30g
3	Impalcati fase 2	Completamento delle carpenterie nella zona con fori; tesatura dei cavi di post-tensione nelle travi cassero e completamento della tesatura in tutti i traversi; fissaggio degli apparecchi d'appoggio	8g	30g
4	getto 3	Getto della soletta superiore di completamento con calcestruzzo Rck45	190g	760g
5	Esercizio	Entrata in esercizio delle strutture con applicazione dei carichi permanenti portati e di quelli accidentali;	9750g	9000g

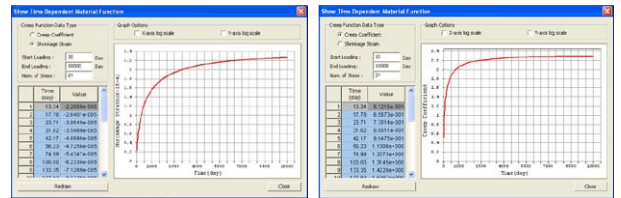


Modello 3D complessivo

La modellazione dei singoli elementi strutturali in relazione al loro comportamento composito ed alle tempistiche con cui esso si manifesta nel corso delle fasi costruttive, è stato uno degli aspetti di maggiore interesse tra quelli affrontati. Il comportamento composito tra le varie sezioni componenti le singole travi, di cui ciascuna caratterizzata da materiali con proprietà diverse e variabili nel tempo, è stato modellato utilizzando il modulo "Composite Section for Construction Stage". Quest'ultimo ha permesso di valutare l'azione composita tra i tegoli a "II" e la soletta di completamento, nonché di tenere conto delle proprietà della sezione composta dalle "travi cassero" di fase 1, dal riempimento in calcestruzzo di fase 2 e dalla soletta di completamento di fase 3.



Definizione delle proprietà per sezioni composite Rck55/Rck45 e Composite Section for Construction Stage - sezione trave a cassone in fase d'esercizio



Definizione delle proprietà dei materiali in funzione del tempo

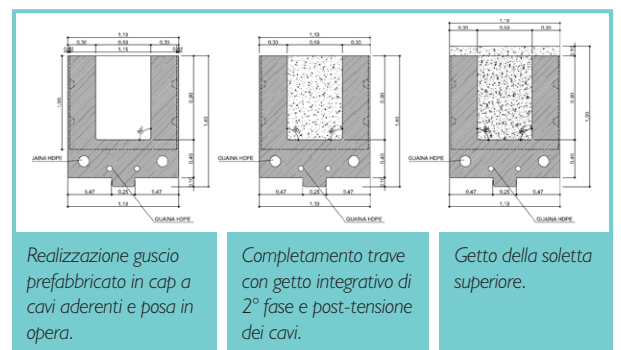
All'interno del software tali componenti sono denominati "parti" e le rispettive proprietà sono state determinate utilizzando elementi fittizi del tipo "GN section", poi inserite nel modulo che genera la sezione composita.

Al fine di portare in conto il comportamento reologico dei materiali nel corso delle diverse fasi costruttive, di particolare rilevanza data l'elevata iperstaticità della struttura, sono state definiti calcestruzzi con proprietà variabili nel tempo facendo riferimento alle raccomandazioni C.E.B. per la legge di variazione nel tempo della resistenza, del ritiro e della viscosità. Ciò è stato possibile grazie ai moduli "Time Dependant Material Creep and Shrinkage" e "Time Dependant Material Compressive Strength".

I cavi di post-tensione, in acciaio armonico con tensione di rottura pari a $f_{ptk} = 1860$ MPa, sono composti da trefoli modellati come elementi "tendon" con tipologie "internal (pre-tension)" ed "internal (post-tension)" in grado di simulare la pre-tensione e la post-tensione come sollecitazioni applicate sulla lunghezza della trave. In particolare gli elementi a "II" e ad "U" prefabbricati posti in opera in "fase 1" sono pre-tesi mentre la post-tensione interessa le sezioni composite costituite dagli elementi ad "U" e dal getto di completamento in c.a., nonché i traversi intermedi e di testata.

Le operazioni di post tensione interessano la struttura a partire dalla "fase 3" fatta eccezione per i rompi-tratta degli elementi ad "U" cui sin dalla "fase 1" viene applicata una post-tensione parziale per consentire il comportamento monolitico delle travi principali prima che sia completata la zona forata, che ad esse si appoggia. Le sezioni delle travi sono attivate con le loro caratteristiche inerziali nelle singole fasi in funzione delle sequenze dei getti previsti. Per quanto concerne i traversi, che divengono attivi unicamente all'attivazione della rispettiva post-compressione, per evitare l'inserimento di ulteriori fasi, si è utilizzato l'artificio di assegnare loro un modulo elastico praticamente nullo sino al giorno dell'attivazione.

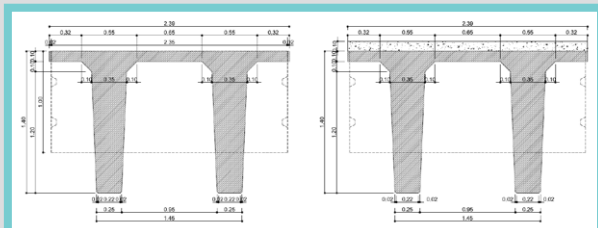
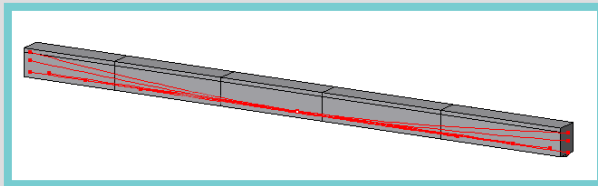
Definita la geometria, le proprietà dei materiali ed il numero di trefoli per ciascuna trave, il carico di pretensione è stato assegnato come tensione massima applicabile in fase di tiro al trefolo. Tale carico viene attivato all'interno di essa in corrispondenza della fase, e del giorno, in cui si prevede la tesatura dei trefoli. Altri carichi presi in considerazione, oltre alle usuali finiture e carichi accidentali, sono le pressioni indotte dal passaggio del treno, le variazioni termiche, nonché i carichi trasmessi dalle strutture di facciata cui gli impalcati fungono da supporto. Per quanto concerne il sisma verticale, sono state seguite le prescrizioni del D.M 96 valutando quindi gli effetti conseguenti ad un aumento percentuale del carico verticale.



Realizzazione guscio prefabbricato in cap a cavi aderenti e posa in opera.

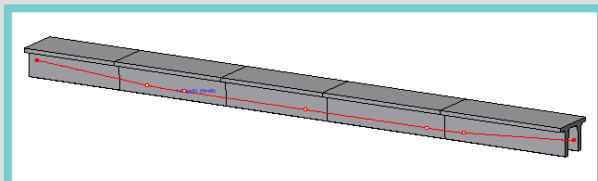
Completamento trave con getto integrativo di 2° fase e post-tensione dei cavi.

Getto della soletta superiore.



Realizzazione guscio prefabbricato in cap a cavi aderenti e posa in opera.

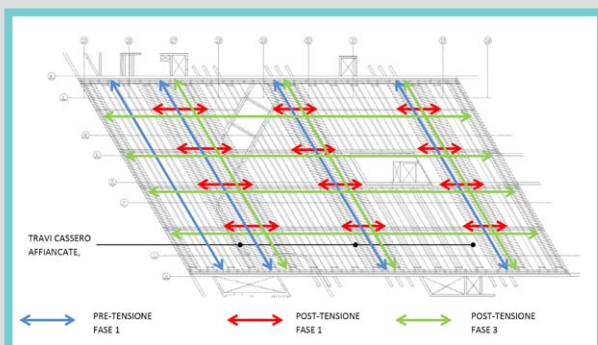
Getto della soletta superiore.



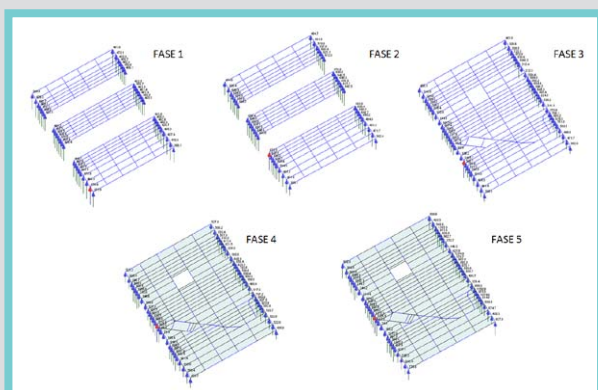
Selezione elementi "beam" con relativi cavi di post-tensione e/o pre-tensione

Risultati e verifiche

L'analisi condotta è del tipo "Construction Stage" che, attraverso la sovrapposizione dei risultati di diverse analisi statiche lineari relative a configurazioni geometriche, proprietà dei materiali, condizioni di carico e di vincolo variabili nel tempo, ha consentito di determinare le reazioni vincolari nonché gli stati di tensione e di deformazione agenti sui singoli elementi strutturali durante le varie fasi costruttive. Per quanto concerne le ragioni vincolari, l'analisi per fasi ha permesso di verificare che l'interazione tra le forze di precompressione presenti nelle travi e nei traversi non determinasse mai azioni di sollevamento in corrispondenza degli appoggi, non progettati per tali condizioni di sollecitazione.



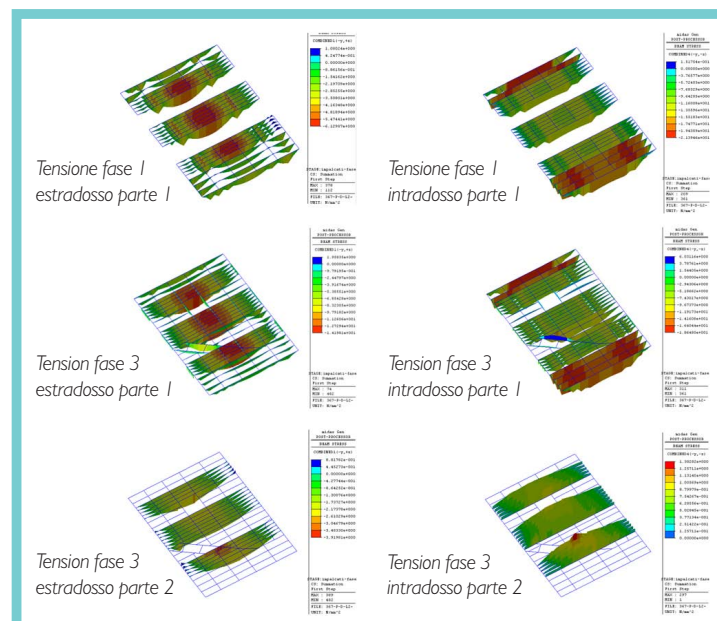
Pre-Tensione e Post-Tensione per le diverse fasi costruttive



Reazioni agli appoggi al termine di ciascun construction stage

Sulla base dei risultati ottenuti, sono state effettuate verifiche di tipo tensionale: per ciascuna delle fasi costruttive è stato verificato che le tensioni massime agenti in corrispondenza di punti significativi delle sezioni non superassero, nell'acciaio e nel calcestruzzo, la massima tensione di esercizio prevista dalla norma in funzione della classe di resistenza del materiale adottato.

Essendo le sezioni composte, il software restituiva tali risultati distintamente per ciascuna delle "parti" di cui si componeva l'elemento in esame. Per la sezione a cassone ad esempio, la parte 1 corrispondeva all'elemento preteso ad "U", la parte 2, attivata in corrispondenza della fase 3, al riempimento in calcestruzzo, la parte 3, attivata in corrispondenza della fase 4, alla soletta di completamento. Per completezza sono state effettuate verifiche manuali a flessione ed a taglio per gli SLU.



Stato tensionale negli elementi primari, fasi 1 e 3

Conclusioni

La modellazione effettuata ha permesso di sviluppare la progettazione di svariate tipologie di elementi pre-tesi e post-tesi sia nel transitorio che per le condizioni di lungo termine. Ciò è stato possibile grazie all'utilizzo di quattro diversi moduli messi a disposizione dal software di calcolo:

- "Construction stage analysis": ha permesso di combinare gli effetti dovuti alla sovrapposizione di condizioni di carico distinte corrispondenti a diverse configurazioni geometriche della struttura;
- "Time Dependant Material": nelle due versioni "Compression Strength" e "Creep and Shrinkage" ha permesso di valutare gli effetti sulle strutture dovuti alla variazione nel tempo della rigidità dei materiali nonché di tenere conto degli effetti del ritiro e della viscosità;
- "Composite Section for Construction Stage": ha permesso di tenere conto dell'azione composita tra le varie porzioni di struttura che venivano attivate in corrispondenza delle diverse fasi costruttive;
- "Prestressing Tendon": ha permesso di modellare gli elementi post-tesi e pre-tesi e di valutarne l'interazione con le strutture in c.a. durante le varie fasi costruttive.

La possibilità di utilizzare un unico strumento per l'analisi e la verifica di varie tipologie di elementi in molteplici configurazioni geometriche e di carico ha permesso di elaborare in tempi non troppo lunghi una progettazione per sua natura complessa e bisogna di diverse iterazioni progettuali finalizzate alla soluzione definitiva.

Per approfondimenti vedi anche:

- **Precompressione:** www.cspfea.net/scheda-documento-CSP00023.html
- **Fenomeni reologici:** www.cspfea.net/scheda-documento-CSP00086.html

L'analisi di elementi in calcestruzzo armato in fase fessurata

1. Introduzione

La nascita e lo sviluppo di fessure nelle strutture in calcestruzzo armato, fenomeno usuale anche in presenza di carichi di esercizio, dà luogo ad incrementi deformativi, a ridistribuzioni tensionali tra i materiali e, in strutture iperstatiche, a variazioni dello stato di sollecitazione.

Appare pertanto necessario tenere in conto il fenomeno fessurativo per la determinazione di una risposta strutturale più fedele alla realtà, e ciò richiede lo svolgimento di analisi non lineari, in alcuni casi di difficile controllo ed interpretazione.

Nei paragrafi che seguono si presenta l'analisi in fase fessurata di una trave in calcestruzzo armato staticamente determinata mediante l'utilizzo del programma di calcolo Midas FEA, confrontando i risultati ottenuti con formule analitiche proposte dalle normative vigenti [1].

2. Modellazione dell'elemento strutturale

Nella legge costitutiva del calcestruzzo adottata per l'analisi numerica (total strain cracking), la fessurazione viene descritta mediante un modello a fessurazione diffusa (modello continuo), assumendo che le fessure che si generano localmente siano uniformemente distribuite nella zona di calcestruzzo interessata dal fenomeno fessurativo. Tale modello è adatto per descrivere il comportamento in fase fessurata di strutture in calcestruzzo con un adeguato quantitativo di armatura. Si è scelto inoltre di utilizzare il modello a direzione fissa delle fessure [2].

Le armature sono state modellate mediante elementi inglobati negli elementi solidi (embedded reinforcement). Secondo questo approccio, la rigidità degli elementi che costituiscono le armature è aggiunta alla rigidità del continuo in cui sono introdotti, chiamato 'elemento madre'. In questo modo si assume perfetta aderenza tra le armature e l'elemento madre e si calcolano le deformazioni e i corrispondenti sforzi a partire dagli spostamenti dell'elemento madre.

3. Esempio di calcolo

Per verificare la precisione dei risultati forniti dal programma di calcolo nell'analisi non lineare di elementi in calcestruzzo armato in presenza di fessurazione, si è studiato secondo un approccio analitico e uno numerico il comportamento di una trave appoggiata soggetta ad un carico uniformemente distribuito.

Ci si è inoltre soffermati a valutare la precisione dei risultati numerici al variare del tipo di elementi utilizzati (tetraedrici ed esaedrici), del grado del polinomio costituente le funzioni di forma (lineare o quadratico) e quindi il numero di nodi presenti su ogni lato dell'elemento, delle dimensioni degli elementi della mesh e del tipo di vincolo inserito.

Si consideri la trave di Fig. 1a di luce $l = 10$ m, avente la sezione trasversale costante rappresentata in Fig. 1b, soggetta ai carichi permanenti e variabili $g+q = 40$ kN/m, e se ne studi lo stato tensionale e deformativo sia in campo elastico che in campo fessurato, come suggerito dall'Eurocodice 2 [1].

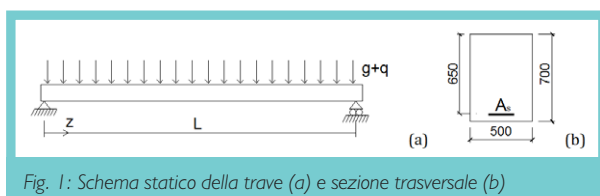


Fig. 1: Schema statico della trave (a) e sezione trasversale (b)

Si adotta un calcestruzzo di classe C30/40, mentre le armature sono in acciaio B450C controllato in stabilimento, da cui risulta

$$\begin{aligned} f_{ck} &= 30 \text{ MPa}; & f_{yk} &= 450 \text{ MPa}; \\ f_{ctm} &= 0.30 \cdot 30^{2/3} = 2.9 \text{ MPa}; & A_s &= 3164 \text{ mm}^2 (7\phi 24); \\ E_c &= 33000 \text{ Mpa} & E_s &= 200000 \text{ MPa} \\ & & \alpha_e &= E_s/E_c = 6.06 \end{aligned}$$

3.1 Soluzione analitica

Nel presente paragrafo, la simbologia adottata è quella riportata in [3]. In accordo con il § 7.4.3. dell'Eurocodice 2 [1], il comportamento deformativo di elementi fessurati, tenendo in conto il contributo irrigidente del calcestruzzo, può essere espresso mediante la relazione:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad [(7.18)\text{-EC2}]$$

essendo:

- α il parametro deformativo sotto controllo;
- α_I, α_{II} i valori del parametro calcolati in assenza di fessurazione (Stadio I) e in sezione totalmente fessurata (Stadio II),
- ζ un coefficiente di distribuzione che tiene conto del contributo irrigidente del calcestruzzo teso fra le fessure, avente espressione.

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \quad [(7.19)\text{-EC2}]$$

con $\zeta = 0$ nelle sezioni non fessurate;

- β un coefficiente che tiene conto della durata e della ripetitività del carico ($\beta = 1$ per carico singolo di breve durata, $\beta = 0.5$ per carichi di lunga durata o ripetuti);
- σ_s la tensione nell'acciaio valutata in Stadio II (sezione fessurata)
- σ_{sr} la tensione nell'acciaio valutata in Stadio II, provocata dal momento di fessurazione.

Si noti che, data la linearità della legge costitutiva dei materiali, in presenza di sollecitazioni esclusivamente flessionali, σ_{sr} / σ_s può essere sostituito da M_{cr} / M , essendo M_{cr} il momento di fessurazione, ottenendo:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \quad [(7.19)\text{-EC2}]$$

La curvatura indotta dalla flessione può quindi scriversi:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_I} (1 - \zeta) + \frac{1}{r_{II}} \zeta = \frac{M}{E_c I_I^*} (1 - \zeta) + \frac{M}{E_c I_{II}^*} \zeta$$

con I_I^*, I_{II}^* momenti di inerzia della sezione omogeneizzata nello Stadio I e nello Stadio II. Introducendo il parametro l_I^*, l_{II}^* si ottiene:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E_c I_I^*} [1 + (c - 1) \zeta]$$

Introducendo i valori numerici della trave in esame, con riferimento allo stadio I, si ha:

$$A^* = 700 \cdot 500 + 6.06 \cdot 3164 = 369173.84 \text{ mm}^2$$

$$I_G^* = \frac{700 \cdot 500^3 \cdot 350 + 6.06 \cdot 3164 \cdot 650}{369173.84} = 365.6 \text{ mm}$$

$$I_I^* = \frac{500 \cdot 700^3}{12} + 500 \cdot 700 \cdot 15.6^2 + 6.06 \cdot 3164 \cdot (650 - 365.6)^2 = 15.93 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$W_{ji}^* = \frac{15.93 \cdot 10^9}{700 - 365.6} = 4.764 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Il momento di fessurazione risulta:

$$M_{cr} = f_{ctm} W_{ji}^* = 2.9 \cdot 4.764 \cdot 10^7 \cdot 10^{-6} = 138.2 \text{ kNm}$$

Il momento in mezzzeria vale $M_{max} = 40 \cdot 10^2 / 8 = 500 \text{ kNm}$, da cui è possibile introdurre il parametro $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{cr}} = \frac{500}{138.2} = 3.6$

Nello stadio II si ha invece:

$$-\frac{500 \cdot y_n^2}{2} + 6.06 \cdot 3164 \cdot (650 - y_n) = 0$$

$$y_n^2 + 76.69 y_n - 49851.98 = 0 \rightarrow y_n = -38.35 + \sqrt{38.35^2 + 49851.98} = 188.2 \text{ mm}$$

$$I_{ii}^* = \frac{500 \cdot 188.2^3}{3} + 6.06 \cdot 3164 \cdot (650 - 188.2)^2 = 5.2 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Risulta quindi $c = \frac{I_{ii}^*}{I_{ii}^*} = \frac{15.93}{5.20} = 3.06$.

Per lo spostamento di mezzzeria può scriversi:

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = v_1\left(\frac{L}{2}\right) + \Delta v\left(\frac{L}{2}\right) = v_1\left(\frac{L}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta v(L/2)}{v_1(L/2)}\right)$$

Essendo v_1 lo spostamento calcolato in primo stadio e $\Delta v(L/2)$ l'incremento di tale spostamento dovuto alla fessurazione. Applicando il Principio dei Lavori Virtuali, in virtù della simmetria del problema e dell'espressione della curvatura in fase fessurata, l'incremento di spostamento assume la forma:

$$\Delta v\left(\frac{L}{2}\right) = 2(c-1) \frac{M_{max} L^2}{E_c I_{ii}^*} \left[\int_{\xi_1}^1 f_M(\xi) g(\xi) d\xi - \int_{\xi_1}^1 \beta \frac{M_{cr}^2}{M_{max}^2} \frac{f_M(\xi)}{g(\xi)} d\xi \right], \xi = \frac{z}{L}$$

essendo $f_M(\xi)$ il momento flettente non dimensionale provocato da una forza unitaria agente nella mezzzeria della trave, $M(\xi) = M_{max} \cdot g(\xi)$ il momento provocato dal carico distribuito e ξ_1 l'ascissa ove inizia la parte fessurata della trave. Introdotto $\lambda = M_{max} / M_{cr}$, ricordando che risulta $f_M(\xi) = \xi/2$, $g(\xi) = 4(\xi - \xi_1^2)$ e sviluppando gli integrali a secondo membro, si ottiene la relazione generale:

$$\Delta v\left(\frac{L}{2}\right) = (c-1) \frac{M_{max} L^2}{E_c I_{ii}^*} \left[\frac{5}{48} + \xi_1^4 - \frac{4}{3} \xi_1^3 - \frac{\beta}{4\lambda^2} \ln[2(1-\xi_1)] \right]$$

L'ascissa ξ_1 risulta $\xi_1 = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{\lambda-1}{\lambda}} \right] = 0.075$

Nel caso in esame si ha quindi:

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5}{48} \frac{M_{max} L^2}{E_c I_{ii}^*} \left\{ 1 + (c-1) \left[1 + \frac{48}{5} \left(\xi_1^4 - \frac{4}{3} \xi_1^3 \right) - \frac{12}{5} \frac{\beta}{\lambda^2} \ln[2(1-\xi_1)] \right] \right\}$$

Assumendo $\beta = 1$ e introducendo i valori numerici si ottiene:

$$v_1\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5}{48} \frac{500 \cdot 10^6 \cdot 10000^2}{33000 \cdot 15.93 \cdot 10^9} = 9.9 \text{ mm}$$

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = v_1 \cdot \left\{ 1 + (3.06-1) \left[1 + \frac{48}{5} \left(0.075^4 - \frac{4}{3} \cdot 0.075^3 \right) - \frac{12}{5} \frac{1}{3.6^2} \ln[2(1-0.075)] \right] \right\} = 9.9 \cdot 2.815 = 27.9 \text{ mm}$$

Le tensioni nell'armatura in fase non fessurata e fessurata risultano rispettivamente:

$$\sigma_{sI,max} = \alpha_e \frac{M_{max}}{I_{ii}^*} (y_s - y_G^*) = 6.06 \cdot \frac{500 \cdot 10^6}{15.93 \cdot 10^9} (650 - 365.6) = 54.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sII,max} = \alpha_e \frac{M_{max}}{I_{ii}^*} (y_s - y_n) = 6.06 \cdot \frac{500 \cdot 10^6}{5.2 \cdot 10^9} (650 - 188.2) = 269.1 \text{ MPa}$$

Le tensioni al lembo superiore della sezione in calcestruzzo in fase non fessurata e fessurata risultano invece rispettivamente

$$\sigma_{cl,min} = \frac{M_{max}}{I_{ii}^*} (-y_G^*) = \frac{500 \cdot 10^6}{15.93 \cdot 10^9} (-365.6) = -11.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cl,min} = \frac{M_{max}}{I_{ii}^*} (-y_n) = \frac{500 \cdot 10^6}{5.2 \cdot 10^9} (-188.2) = -18.1 \text{ MPa}$$

3.2 Soluzione numerica

Le leggi costitutive adottate nel modello in esame sono:

CALCESTRUZZO

- Compressione: comportamento elastico lineare caratterizzato da modulo $E_c = 33.000 \text{ MPa}$.
- Trazione: comportamento elasto-fragile definito dalla resistenza a trazione $f_{ctm} = 2.9 \text{ MPa}$. È un modello discontinuo: prima del picco il comportamento è elastico lineare, dopo il picco lo sforzo diventa immediatamente nullo e la deformazione viene totalmente descritta dallo ampiezza di fessurazione.

ACCIAIO

- Trazione e compressione: comportamento elastico lineare caratterizzato da modulo $E_s = 200.000 \text{ MPa}$.

La trave è stata modellata con Midas FEA, in particolare si sono realizzate diverse mesh, facendo variare sia la forma degli elementi, sia il grado delle funzioni di forma. Si è dapprima messo a punto un modello (Fig. 2a) con elementi tetraedrici lineari (spostamenti lineari all'interno dei singoli elementi, a cui sono associate deformazioni costanti), successivamente agli stessi elementi sono stati aggiunti i nodi intermedi, ottenendo così funzioni di forma quadratiche (spostamenti quadratici, deformazioni lineari). Successivamente, per valutare l'influenza del tipo di elemento finito sul risultato, si sono utilizzati elementi esaedrici quadratici (Fig. 2b).

Per valutare poi la dipendenza dalla taglia della mesh, si sono considerati altri due modelli con elementi di dimensioni via via crescenti: elementi tetraedrici quadratici, denominati large (Fig. 2c) ed extra large (Fig. 2d), entrambi quadratici. In tutti i modelli sono state inserite le armature come da progetto.

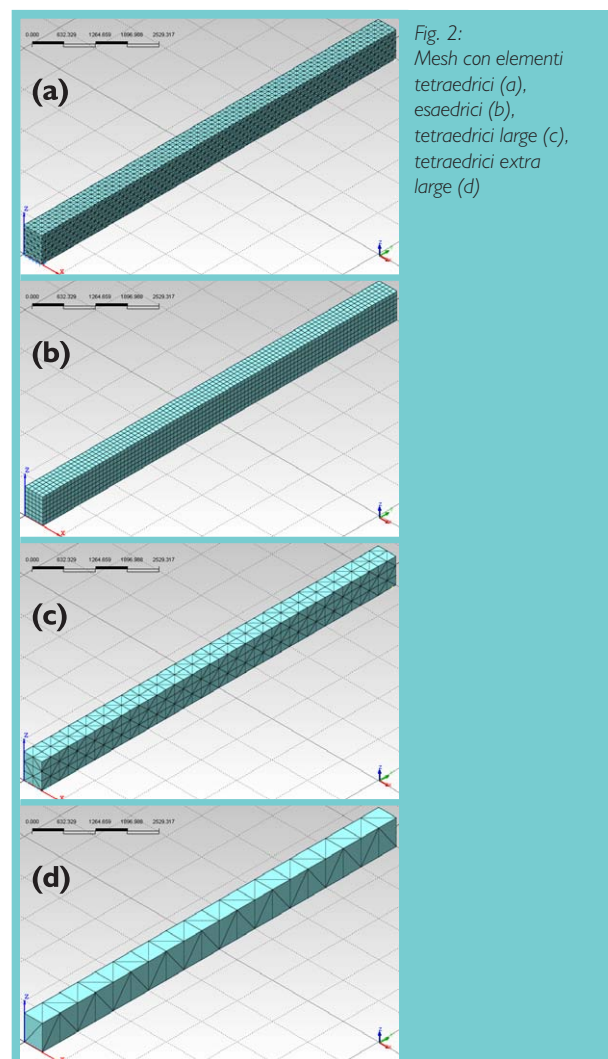


Fig. 2: Mesh con elementi tetraedrici (a), esaedrici (b), tetraedrici large (c), tetraedrici extra large (d)

Infine per valutare l'influenza del tipo di vincolo sul risultato, si è introdotto sia un vincolo rigido sui nodi terminali della trave, sia un vincolo elastico distribuito su tutto il primo elemento della mesh.

I risultati delle analisi in campo elastico e non lineare in termine di tensioni nel calcestruzzo e nelle armature sono riportati in Fig. 3 ÷ Fig. 16, al variare del modello.

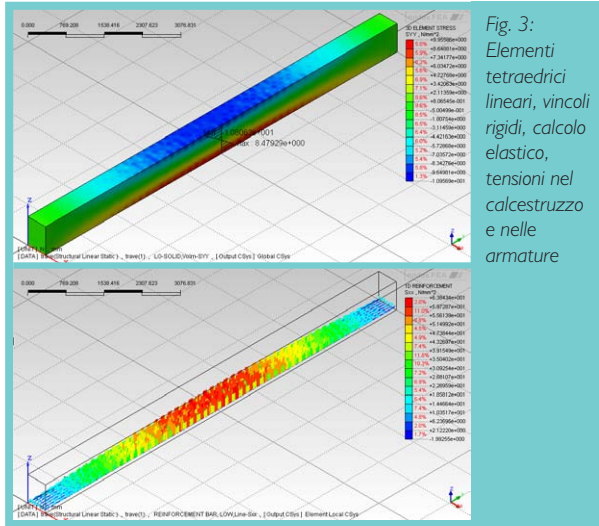


Fig. 3: Elementi tetraedrici lineari, vincoli rigidi, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

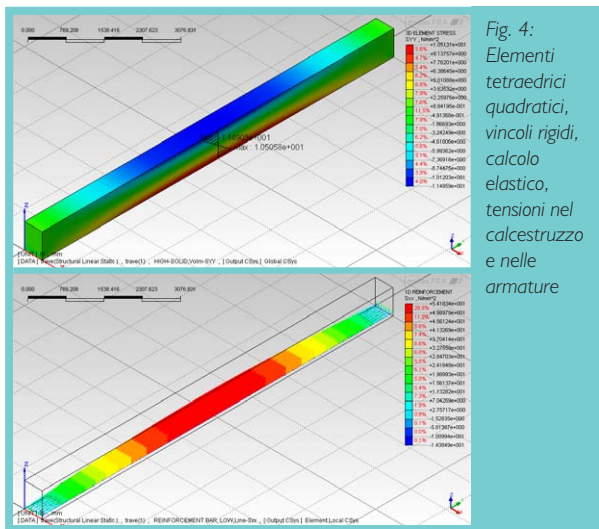


Fig. 4: Elementi tetraedrici quadratici, vincoli rigidi, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

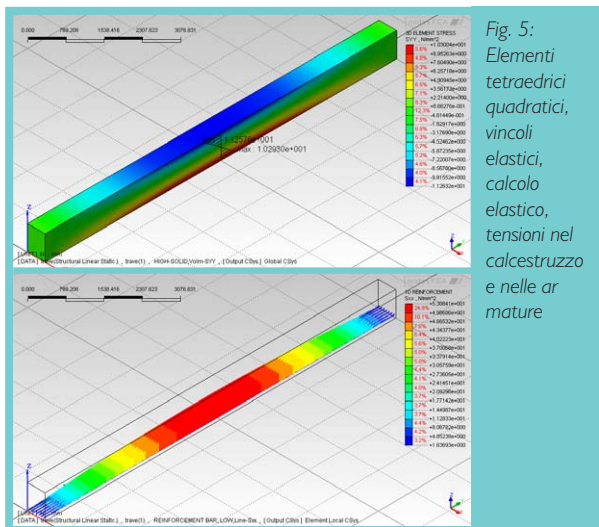


Fig. 5: Elementi tetraedrici quadratici, vincoli elastici, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

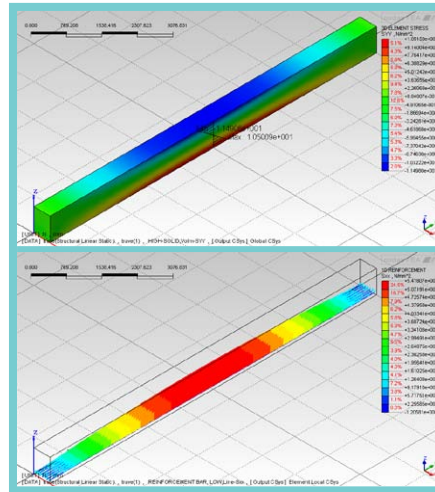


Fig. 6: Elementi tetraedrici quadratici large, vincoli rigidi, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

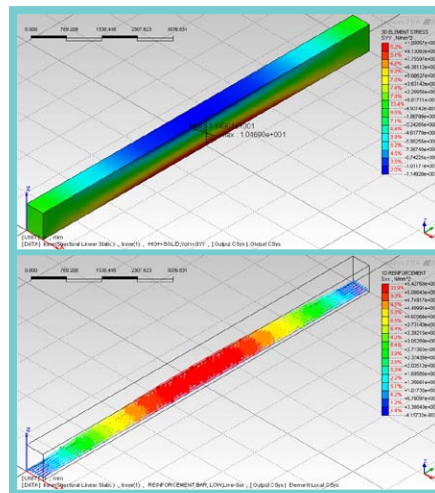


Fig. 7: Elementi tetraedrici quadratici extra-large, vincoli rigidi, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

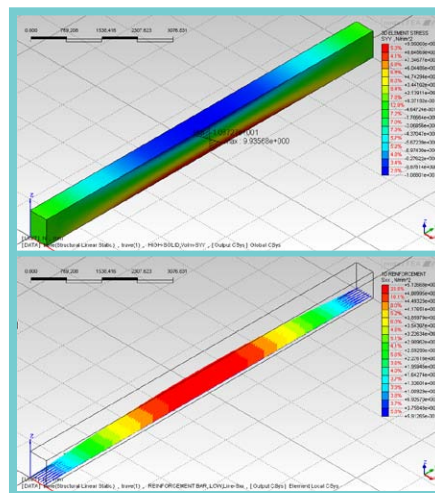


Fig. 8: Elementi tetraedrici quadratici large, vincoli elastici, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

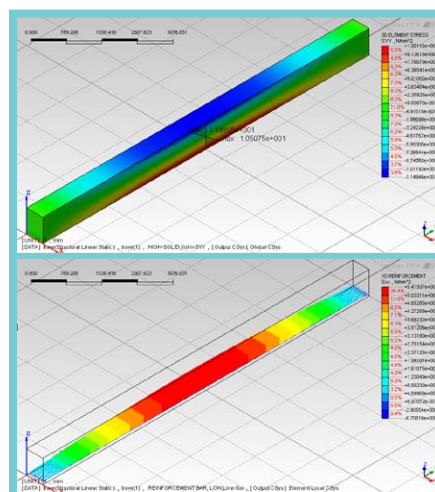


Fig. 9: Elementi esaedrici quadratici, vincoli rigidi, calcolo elastico, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

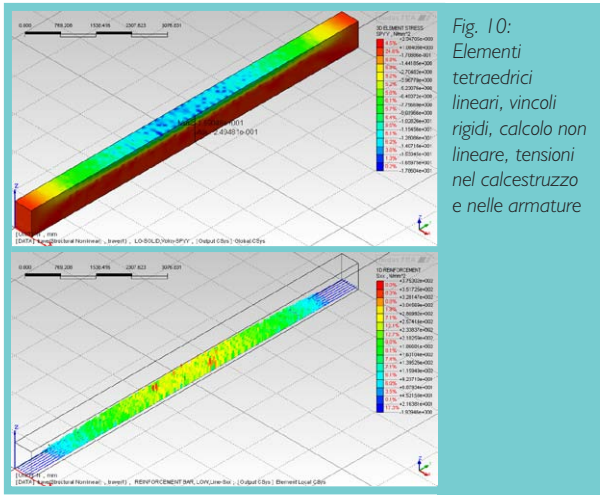


Fig. 10: Elementi tetraedrici lineari, vincoli rigidi, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

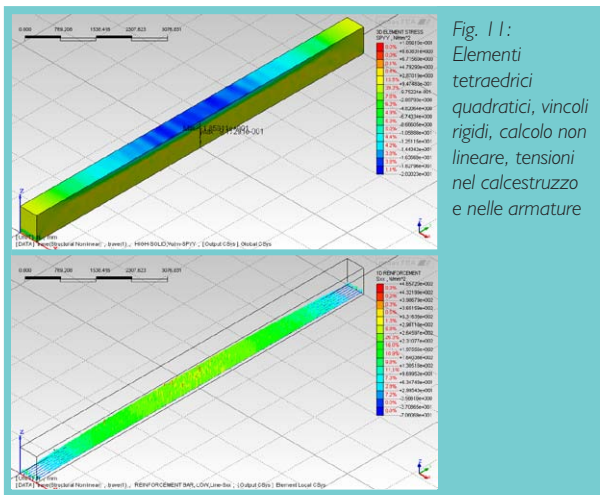


Fig. 11: Elementi tetraedrici quadratici, vincoli rigidi, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

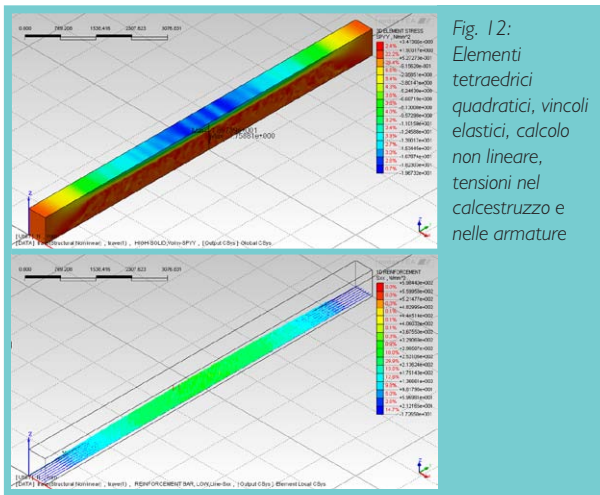


Fig. 12: Elementi tetraedrici quadratici, vincoli elastici, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

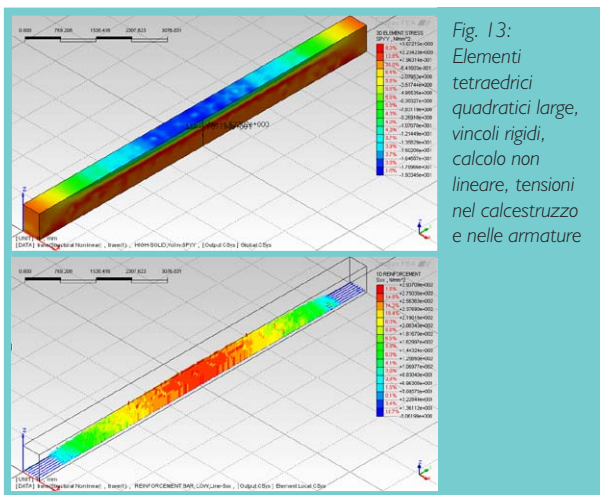


Fig. 13: Elementi tetraedrici quadratici large, vincoli rigidi, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

Dall'analisi comparativa dei risultati si nota che gli elementi lineari già in campo elastico (Fig. 3) non riescono a descrivere correttamente le tensioni nelle armature. In campo elastico i risultati degli altri modelli sono invece pressoché equivalenti (Fig. 4-Fig. 9).

Osservando i risultati delle analisi con fessurazione, si nota che i valori delle tensioni nelle armature sono oscillanti e mostrano dei picchi di tensione estremamente elevati vicino ai vincoli. Sono state quindi effettuate analisi sostituendo ai vincoli rigidi i vincoli elastici (Fig. 12 e Fig. 15).

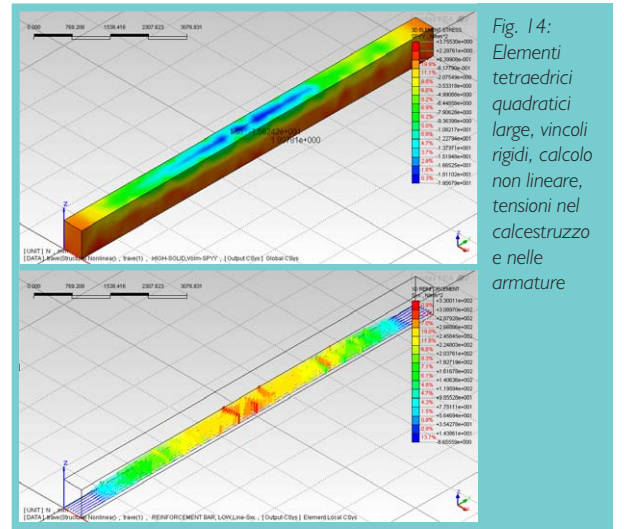


Fig. 14: Elementi tetraedrici quadratici large, vincoli rigidi, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

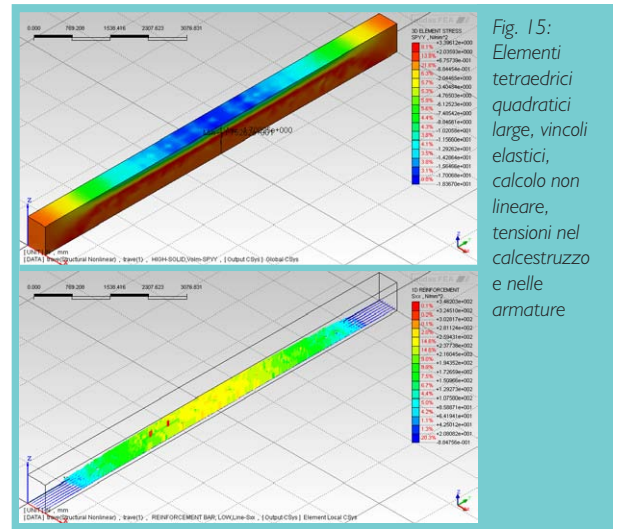


Fig. 15: Elementi tetraedrici quadratici large, vincoli elastici, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

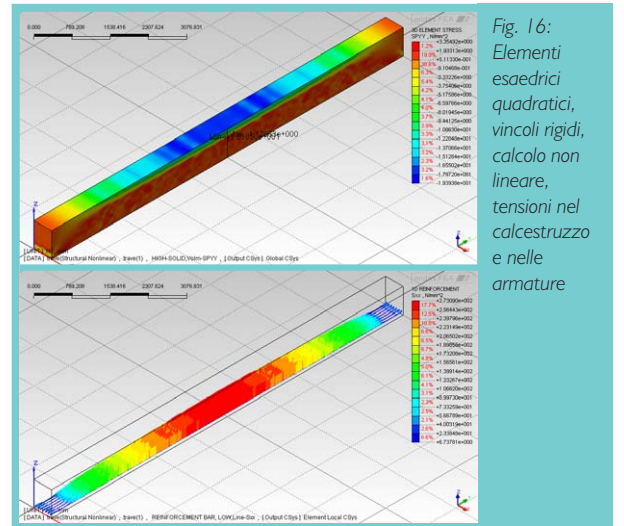


Fig. 16: Elementi esaedrici quadratici, vincoli rigidi, calcolo non lineare, tensioni nel calcestruzzo e nelle armature

Si è poi notato che l'introduzione di elementi di dimensioni maggiori non compromette significativamente la validità dei risultati.

Per meglio studiare il problema dell'oscillazione delle tensioni, che ha come conseguenza valori di picco molto elevati rispetto al valor medio, si riporta nel seguito (Fig. 17) la tensione in una barra di armatura della trave per i diversi modelli.

Si nota che il picco di tensione nelle zone di estremità è dovuto alla concentrazione degli sforzi provocata dalla reazione vincolare e che tale picco diventa trascurabile in presenza di vincoli elastici diffusi. Si nota inoltre che l'interpolazione quadratica del diagramma delle tensioni coglie con buona precisione la distribuzione delle tensioni valutata analiticamente e che tale oscillazione si smorza all'aumentare della dimensione degli elementi finiti della mesh.

Si può altresì notare che gli elementi esaedrici quadratici garantiscono una minor oscillazione delle tensioni nelle armature, benché tali elementi siano più difficili da utilizzare in modelli con geometria complessa o con elementi aventi una dimensione decisamente superiore alle altre due. Un buon risultato si può comunque ottenere con elementi tetraedrici quadratici, anche di taglia maggiore.

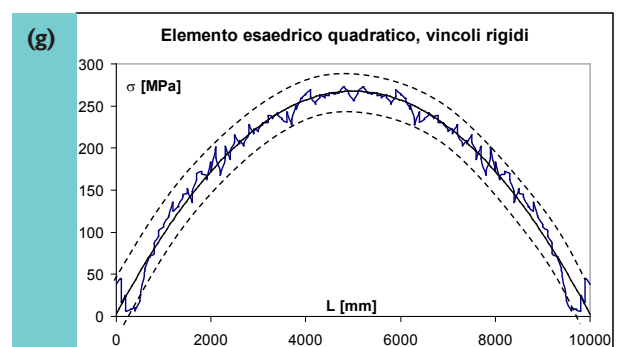
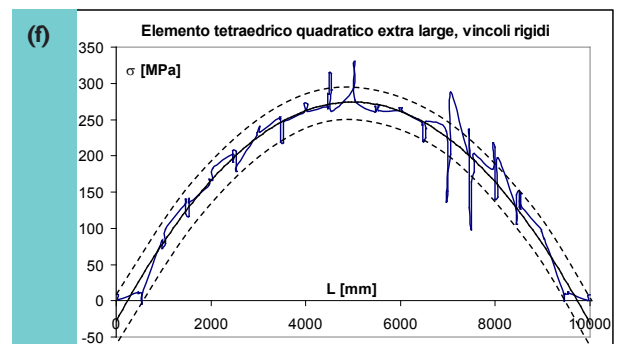
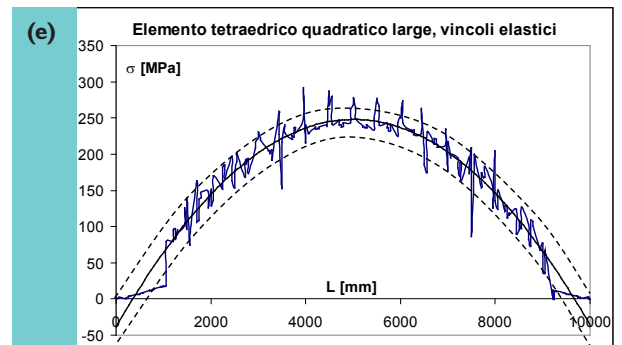
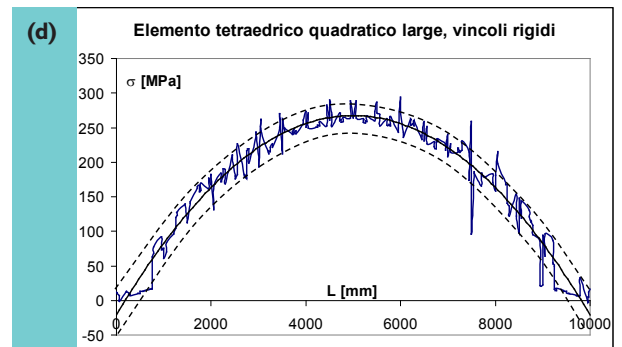
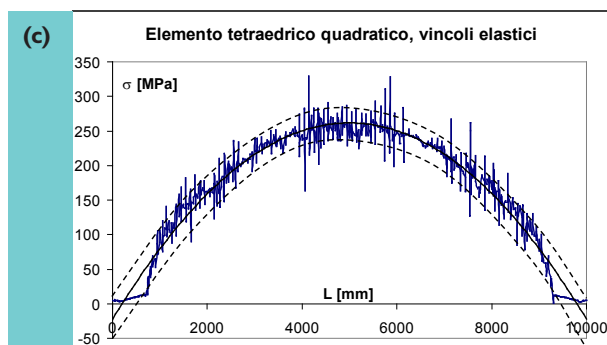
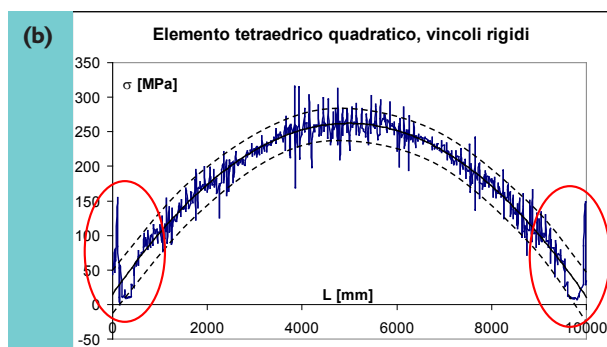
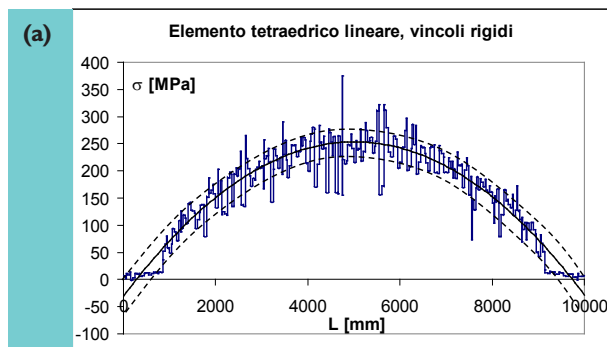


Fig. 17 (a-g): Tensione nelle armature al variare degli elementi finiti

Anche la sezione di transizione tra la zona integra e la zona fessurata, $z_1 = 0.075 \cdot L = 750$ mm, è descritta con precisione, quando i risultati non risentano dei picchi dovuti all'appoggio concentrato (casi a, c, e).

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata in Tab. 1 e Tab. 2 dove, con riferimento rispettivamente alle fasi non fessurata e fessurata, sono messi in evidenza anche i confronti tra i risultati analitici e quelli numerici.

Tabella 1: Calcolo elastico: risultati numerici e analitici

ELEMENTI	v_l [mm]	$v_{l,t}$ [mm]	errore [%]	$\sigma_{sl,max}$ [MPa]	$\sigma_{sl,max,t}$ [MPa]	errore [%]	$\sigma_{dl,min}$ [MPa]	$\sigma_{dl,min,t}$ [MPa]	errore [%]
tetra lin VR	9.4	9.9	-5%	63.8(*) (52.5)	54.1	18%(*) (-3%)	-10.8	-11.5	-6%
tetra quad VR	10.1	9.9	2%	54.2	54.1	0.2%	-11.5	-11.5	0%
tetra quad VE	9.8	9.7	1%	53.1	53.0	0.2%	-11.3	-11.3	0%
tetra quad+ VR	10.1	9.9	2%	54.2	54.1	0.2%	-11.5	-11.5	0%
tetra quad+ VE	9.4	9.4	0%	51.3	51.4	-0.2%	-10.9	-10.9	0%
tetra quad++ VR	10.0	9.9	1%	54.3	54.1	0.4%	-11.5	-11.5	0%
esa quad VR	10.1	9.9	2%	54.1	54.1	0%	-11.5	-11.5	0%

(*) Valore di picco (tra parentesi è riportato il valore dell'interpolazione quadratica)

Tabella 2: Calcolo non lineare in fase fessurata: risultati numerici e analitici

ELEMENTI	v (l/2) [mm]	v_t (l/2) [mm]	errore [%]	$\sigma_{sl,max}$ [MPa]	$\sigma_{sl,max,t}$ [MPa]	errore [%]	$\sigma_{dl,min}$ [MPa]	$\sigma_{dl,min,t}$ [MPa]	errore [%]
tetra lin VR	27.7	27.9	-0.7%	375.3(*) (254)	269.1	(6%)	-16.9	-18.1	-7%
tetra quad VR	31.0	27.9	11%	315(*) (263)	269.1	(2%)	-18.6	-18.1	3%
tetra quad VE	29.7	27.2	9%	330(*) (262)	263.7	(-0.6%)	-17.0	-17.7	4%
tetra quad+ VR	30.5	27.9	9%	293.7(*) (270)	269.1	(0%)	-18.8	-18.1	4%
tetra quad+ VE	27.9	26.2	6%	292(*) (250)	255.6	(-2%)	-17.5	-17.2	2%
tetra quad++ VR	31.5	27.9	13%	330(*) (275)	269.1	(2%)	-15.6	-18.1	14%
esa quad VR	31.1	27.9	11%	273.1(*) (269)	269.1	(0%)	-18.2	-18.1	0.5%

(*) Valore di picco (tra parentesi è riportato il valore dell'interpolazione quadratica)

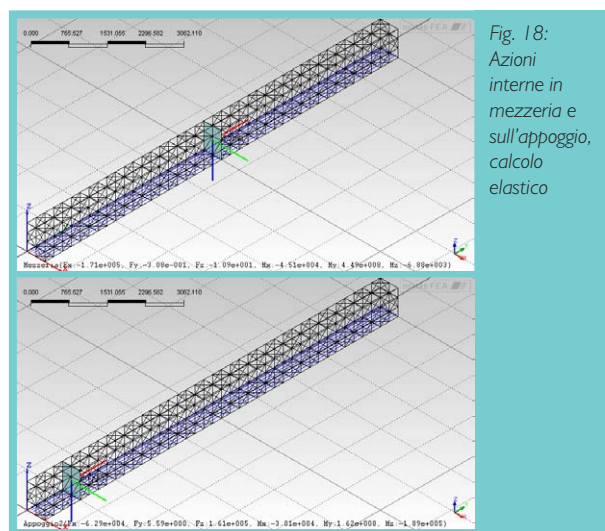


Fig. 18: Azioni interne in mezzeria e sull'appoggio, calcolo elastico

Utilizzando la funzione per il calcolo delle azioni interne, nel caso del calcolo elastico si ottiene (come riportato in Fig. 18) in mezzeria $N = -171$ kN, $M = 449$ kNm (mentre dalle condizioni di equilibrio della trave si ottiene $N = 0$, $M = 500$ kNm) e ad un metro dall'appoggio $V = 161$ kN (dall'equilibrio, $V = 160$ kN).

La differenza tra i valori numerici e quelli analitici è dovuta al fatto che il programma di calcolo integra solamente le tensioni sul calcestruzzo. Infatti, aggiungendo il contributo delle armature (la cui tensione in mezzeria è pari a 54.18 MPa), si ottiene $N_s = 171$ kN, $M_s = 51$ kNm, da cui i valori totali $N = 0$, $M = 500$ kNm, coincidenti con quelli teorici.

Le risultanti nel dominio fessurato risultano invece (Fig. 19): in mezzeria $N = -863$ kN, $M = 249$ kNm. La tensione nelle armature risulta pari a 270 MPa, a cui corrispondono $N_s = 854$ kN, $M_s = 256$ kNm. Le azioni interne totali in mezzeria risultano quindi $N = -9$ kN, $M = 505$ kNm, con errori inferiori all'1%.

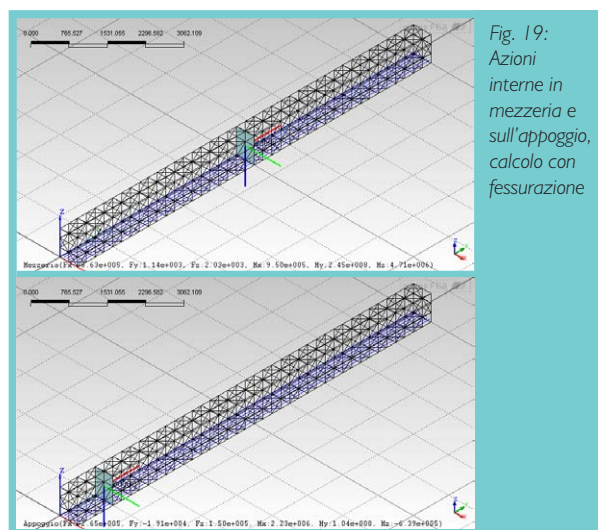


Fig. 19: Azioni interne in mezzeria e sull'appoggio, calcolo con fessurazione

4. Conclusioni

L'analisi numerica di una trave semplicemente appoggiata in calcestruzzo armato in presenza di fessurazione mediante il programma Midas FEA ha fornito buoni risultati sia in termini di spostamento che di tensioni e sollecitazioni, se confrontati con le soluzioni analitiche proposte dai codici normativi.

Rimane comunque da sottolineare che, soprattutto qualora ci si dedichi ad una modellazione strutturale non lineare, sia di fondamentale importanza, da un lato, procedere previamente all'esecuzione di prove su elementi semplici o parti dell'intera struttura che si deve modellare, per la scelta degli elementi finiti e delle dimensioni più adeguate, dall'altro lato, effettuare un attento controllo ed un'analisi approfondita della soluzione ottenuta confrontandola sia con soluzioni elastiche, sia con soluzioni teoriche, anche approssimate.

5. Bibliografia

- [1] Eurocode 2 (2004). Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1.
- [2] Midas FEA v2.9.6 (2009) Nonlinear and detail FE Analysis System for Civil Structures. Midas Information Technology Co. Ltd.
- [3] Mola F., Cattaneo S., Giussani F. (2008). Stati limite di esercizio [Sez. 7-EC2]. In: AICAP. Guida all'uso dell'Eurocodice 2 con riferimento alle Norme Tecniche D.M. 14.1.2008 - Vol. 1 Progettazione di strutture in calcestruzzo armato. p. 307-353, Pubblicamento.

Si è valutata infine la precisione del programma numerico nel calcolo delle azioni interne dell'elemento strutturale mediante la funzione automatica di integrazione delle tensioni.

Per approfondimenti vedi anche:

• **Fessurazione travi CA:** www.cspfea.net/scheda-documento-CSP00231.html

La Validazione e la Verifica dei modelli di calcolo strutturale: gli standard internazionali e le procedure dei produttori software.

L'articolo sarà presentato al convegno ANIDIS 2011 a Bari 19-22 settembre

12

Ing. Paolo Segala, CSPFea s.c.
www.cspfea.net

Perché passare a modelli di calcolo sempre più sofisticati?

L'aumento della potenza di calcolo e della complessità di analisi permessa dai software moderni permette di considerare modelli numerici sempre più vasti e sofisticati. L'ingegnere strutturista è spinto a questi modelli per ricercare strutture sempre più ottimizzate, avendo a disposizione Norme Tecniche e Codici Internazionali che guidano ad un approccio sempre più prestazionale, e all'analisi accurata di ogni Stato Limite. I calcoli che qualche tempo fa servivano al dimensionamento degli elementi strutturali, oggi sono spesso utilizzabili solo come calcoli di verifica "di larga massima" come li definisce il Capitolo 10.2 delle NTC2008. Va precisato che nel seguito dell'articolo dovremo distinguere tra *analisi*, ovvero la ricerca di parametri di sollecitazione, tensioni e deformazioni, e *dimensionamenti*, ovvero le regole che portano al progetto o verifica dei singoli elementi strutturali e delle loro sezioni principali sia in materiale omogeneo (come, ad esempio, i profili in acciaio) che come composti (calcestruzzo armato, acciaio-calcestruzzo, profili composti, rinforzi FRP, etc.).

Le analisi costituiscono la base di un corretto progetto: l'errore di una analisi si ripercuote drasticamente su dimensionamenti errati, anche se formalmente corretti. Le analisi condotte coi moderni software di calcolo, specialmente quelle sismiche e quelle avanzate, richiedono esperienza in nuovi settori: nella modellazione geometrica 3D, nell'abilità di creare correttamente il modello numerico, nella capacità di gestire i numerosi parametri delle analisi lineari (a partire da analisi modali con spettro di risposta) e soprattutto di quelle non lineari (dove almeno la "pushover" è ormai all'ordine del giorno). Nei convegni mondiali di Benchmarking, gruppi di lavoro di esperti accademici, alle prese con lo stesso problema, utilizzando lo stesso software, giungono spesso a risultati diversi senza che nessuno si scandalizzi. Di fronte a queste nuove potenzialità, l'ingegnere alle prese con la pratica professionale rimane con una preparazione di poco mutata rispetto a quanto fornito dall'università di provenienza, e se i progressi sulle interfacce grafiche gli permettano di creare modelli complessi senza particolari difficoltà rischia tuttavia di creare modelli non più gestibili ed interpretabili.

Citando un recente documento dell'Ordine di Milano, "se i mezzi di calcolo sono molto progrediti, non così i mezzi di controllo", non stupisce quindi il risultato di una recente statistica di ISI (Ingegneria Sismica Italiana) che ha chiesto ad un campione di 500 strutturisti di buona preparazione quale caratteristica ritiene sia più importante per un software di calcolo. Il 37% ha risposto "la controllabilità dei risultati di analisi e le verifiche conformi alle NTC", il 32% "il poter affrontare qualsiasi modello strutturale (software polivalente)", e il 25% "Software certificato, validato, affidabile". Quasi il 70% degli analisti quindi chiede al software la controllabilità del proprio lavoro cercando di padroneggiarlo in qualsiasi applicazione. Solo un quarto degli intervistati, fortunatamente, chiede al software di risolvergli il dubbio sull'affidabilità del proprio lavoro, cosa che comporta, sempre citando l'Ordine di Milano, una illusione di precisione e di affidabilità che al contrario è subordinata alla correttezza del software ma soprattutto del suo utilizzo.

L'obiettivo deve dunque essere di controllare i propri modelli di calcolo, una attività che come vedremo coinvolge la preparazione degli ingegneri, la qualità del software e soprattutto la qualità delle attività di modellazione alle quali in ambito internazionale si fa riferimento col termine Modeling & Simulation.

Il controllo dei modelli di calcolo: riferimenti normativi internazionali

La letteratura scientifica ha sempre enfatizzato il rigore che dovrebbe permeare tutta l'attività di analisi numerica: da sempre molti autori si sono cimentati nel descriverne le problematiche. Tuttavia è dagli anni '90 che la questione ha assunto un interesse per il Normatore, quando la prassi di simulazione numerica ha avuto a disposizione strumenti complessi come quelli della Fluidodinamica Computazionale. In generale il mondo dell'ingegneria meccanica è stato precursore nel creare strumenti e metodi di controllo e validazione. Il NAFEMS, una istituzione in questo campo, ha pubblicato le sue prime Linee Guida alla Pratica degli Elementi Finiti nel 1992, [1] mentre nel 2007 si è concluso un lungo lavoro di ASME [4], iniziato con la tragedia dello Shuttle Colombia (causata da un errore di calcolo) su spinta della NASA, creando le proprie Linee Guida alla Verifica e Validazione nella meccanica computazionale [5], e la stessa NASA, nel 2008, ha emanato la propria Guidance sull'argomento. Sul fronte del nucleare, va citato lo Standard IAEA [3] sull'analisi sismica delle centrali nucleari, del 2003. In ambito nazionale, in anticipo, va detto, rispetto agli Eurocodici, il tema è stato trattato al Capitolo 10.2 delle NTC2008, con una evidente continuità rispetto alle CNR 10024 del lontano 1986, bisognose di una doverosa revisione, ma che vengono riprese in più punti dalle NTC.

La proposta: Linee Guida come protocollo volontario di buone pratiche per la validazione dei modelli di calcolo

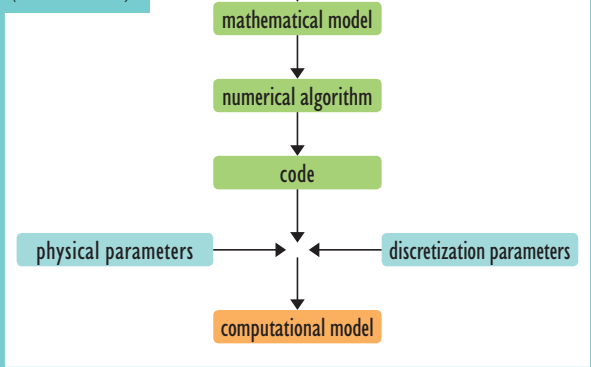
È chiaro che un argomento che ha generato tanta letteratura e norme a livello internazionale non può trovare sufficiente spazio in un paragrafo di normativa ed è ravvisabile la necessità che si affronti la tematica in analogia a quanto fatto con le CNR 10024 del 1986, mediante delle Linee Guida, ovvero con un approccio volontario e suggerimenti di buon senso che non precludono all'iniziativa del singolo professionista che nel calcolo numerico esprime la qualità e il valore del proprio operato e ha sviluppato una vera e propria "arte" nel controllo dei modelli di calcolo che applica a tutela delle proprie responsabilità. I paragrafi che seguono riprendono proprio i concetti e le metodologie proposte da Enti di comprovata affidabilità in ambito internazionale.

Modeling & Simulation: il concetto base dell'attività di calcolo

Le linee guida V&V10 sono state redatte dal Comitato V&V10* di ASME. Col nome di Modeling & Simulation (M&S) vengono descritte le operazioni dell'analista di strutture che si appresta ad eseguire un calcolo. V&V10 chiede all'analista di dichiarare, descrivere e giustificare le attività di M&S scomponendole in: elaborazione di un Modello Concettuale, scelta e utilizzo di un Modello Matematico, utilizzo di un Algoritmo Numerico attraverso un Codice di Calcolo, input di parametri fisici nel Codice di Calcolo, scelta di parametri di discretizzazione del modello. Queste attività conducono l'analista ad ottenere un Modello Computazionale. Si riporta in figura 1 il tipico Flow Chart concettuale del M&S e in Tabella 1 un esempio.

*Il V&V10 è un gruppo di lavoro composto, come nella tradizione anglosassone, da molti esperti praticanti la professione, alcuni produttori di software e pochi consulenti accademici.

Fig. 1:
Modeling &
Simulation
(ASME V&V10)



Step	Esempio	Note
Processo Fisico (Struttura) da analizzare	Valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio esistente in muratura e calcestruzzo. (quale grandezza? Quali misure? Quale grado di dettaglio?)	Ha a che fare con il Cap. 10.2, a): <i>Tipo di analisi svolta</i>
Modello Concettuale: l'insieme delle assunzioni e descrizioni dei fenomeni fisici che sottendono al Processo Fisico da analizzare, dai quali derivano i modelli matematici	Analisi di pushover con metodo a telaio equivalente, cerniere fenomenologiche con comportamento elastoplastico-fragile secondo il modello proposto da EC8, determinazione della curva di capacità secondo il metodo prescritto dalle NTC2008, verifica delle rotazioni alla corda ...	
Algoritmi numerici: l'implementazione numerica del modello matematico mediante algoritmi, usualmente in forma discretizzata (FEM), algoritmi di soluzione, criteri di convergenza. Evidenziando le specificità degli algoritmi quando si ritiene che esse siano determinanti per la corretta simulazione.	Algoritmo di analisi non lineare per struttura in CA e muratura considerando la plasticità del materiale (concentrata in cerniere), eventuale non linearità geometrica (P-d), incrementi di carico controllati col metodo Arc-Lenght, dipendenza del diagramma Momento-Rotazione dallo sforzo normale agente e variabile ad ogni step, convergenza controllata da norma sugli spostamenti, algoritmi di verifica locale di deformazione per meccanismi duttili, etc...	Ha a che fare con: <i>Lidoneità del programma nel caso specifico di applicazione</i> (10.2, c.1)
Modello computazionale: il modello specifico generato nell'ambito del software usato, con i dati di input relativi alla fisica del struttura, i criteri di discretizzazione, i parametri richiesti dall'algoritmo implementato, etc.	Modello composto da 25 travi e 19 pilastri, con 88 cerniere plastiche, condizioni di carico, gruppi di forze orizzontali proporzionali al 1° modo, condizioni di vincolo, criterio di convergenza basato sulla norma degli spostamenti, passi di carico con controllo in spostamenti, algoritmo di arc-lenght, etc...	

Per affrontare correttamente una attività di M&S, non è sufficiente disporre di un software certificato, e come vedremo successivamente è illusorio sperare di certificare un software composto da milioni di righe di codice. Il problema è che qualsiasi attività di M&S è molto più articolata del mero utilizzo di un software. Il disastro del Columbia fu, in questo senso una lezione per NASA. Lo Shuttle subì un impatto con un piccolo corpo, in orbita, il quale danneggiò il rivestimento termico della navicella spaziale. Tale impatto fu immediatamente simulato con un software ne fu stabilita la non gravità ai fini del rientro. Il veicolo, raggiunta l'atmosfera terrestre, esplose a causa del reale danno al rivestimento.

La Commissione di Indagine scoprì che il software utilizzato era stato scritto per valutare impatti di meteoriti sul suolo lunare (applicazione errata, cioè errato Modello Concettuale), utilizzato da un Junior Engineer (che introduce il tema della preparazione dell'utente), con un probabile errore nelle unità di misura introdotte (errori Parametri Fisici nel modello numerico), al termine del quale i risultati della Simulazione segnalavano un leggero superamento dello Stato Limite ricercato. Il Senior Engineer, possiamo immaginare le pressioni sulla sua decisione, ritenne di autorizzare comunque il rientro del veicolo. Non crediamo sia azzardato pensare che analoghi problemi sono affrontati quotidianamente nei calcoli di ingegneria civile.

V&V, Validation & Verification: la procedura per la verifica dei modelli di calcolo

Una volta chiariti e documentati i passaggi fondamentali di una attività di Modellazione e Simulazione numerica, ASME evidenzia i metodi per identificare con ragionevole certezza la correttezza di un Modello. I metodi sono quelli di Validazione, per assicurare l'affidabilità, e Verifica, per assicurare l'accuratezza dell'analisi numerica di una struttura. ASME utilizza le seguenti definizioni:

Validazione (Validation): la procedura per quantificare il grado di accurata rappresentazione della realtà fisica, negli ambiti di interesse, da parte del modello;

Verifica (Verification): l'insieme di attività che determinano che un modello computazionale rappresenti accuratamente gli aspetti di modellazione matematica e la soluzione matematica da essa prodotta.

Le attività di Verifica e Validazione permettono di arrivare a giustificare la correttezza di un Modello di Calcolo, considerando che, citando lo statistico George Box, "Ogni modello numerico è sbagliato, tutta via alcuni di essi rimangono utili".

Per essere più specifici, William Oberkampf (al Transport Task Force Meeting, NNSA, 2004), sottolineava:

Verifica: risponde alla domanda "Ho fatto il modello giustamente (correttamente)? Ha a che fare con la Matematica

Validazione: risponde alla domanda "Ho fatto il giusto modello (per il fenomeno fisico allo studio)?" Ha a che fare con la Fisica

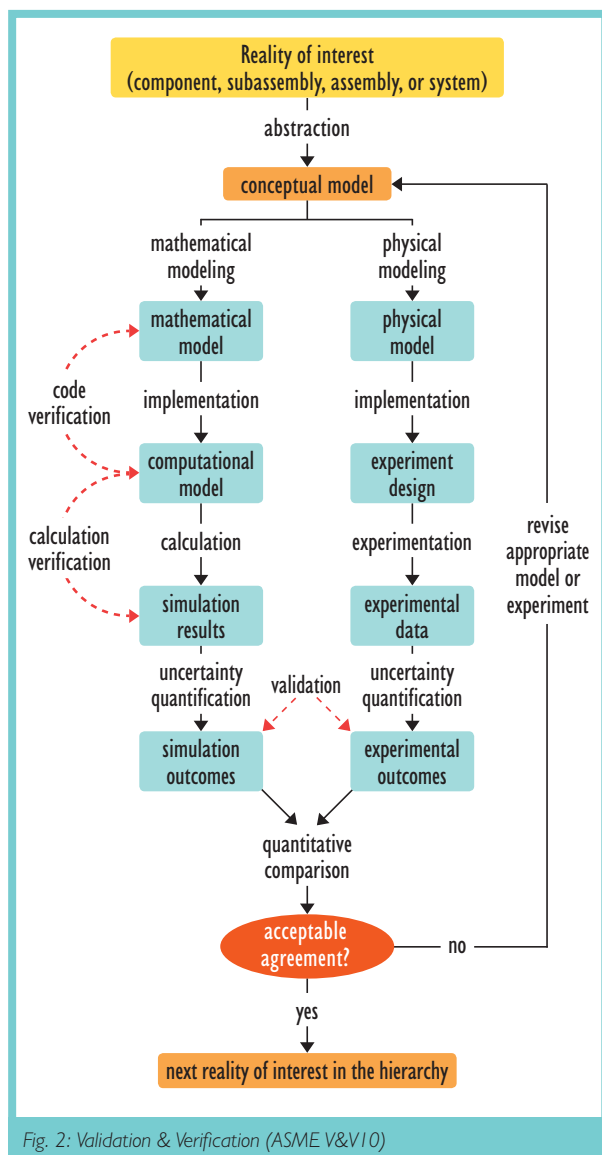
Per rendere complete le attività sopra descritte, è necessario suddividere la Verifica in due parti ulteriori:

- i. Verifica del Codice (Code Verification):** stabilire un livello di confidenza, attraverso tests comprovati, affinché il modello matematico e l'algoritmo risolutivo funzionino correttamente;
- ii. Verifica delle Calcolazioni (Calculation Verification):** stabilire un livello di confidenza, attraverso tests comprovati, che la "soluzione discretizzata" del modello matematico sia accurata.

Cercando di specificare anche queste due definizioni, citando P. Roache, a margine del 2008 Lisbon Workshop su "CFD Uncertainty Analysis", si può dire che:

- i. Verifica del Codice (Code Verification):** dimostrare che il codice è corretto; è in grado di fornire una corretta soluzione matematica delle equazioni che governano il continuo al $\lim \Delta \rightarrow 0$; il grado di convergenza è verificato almeno per problemi ben posti;
- ii. Verifica delle Calcolazioni (Calculation Verification):** riguarda l'accuratezza della soluzione; gli errori di discretizzazione (mesh) e il peso delle incertezze sui parametri dell'analisi sono stimati, nei casi più complessi, senza avere la conoscenza della soluzione.

ASME riporta tutti questi concetti in Fig.2



Nelle definizioni date alle due Verifiche e alla Validazione ciascun ingegnere analista potrà riconoscere alcune delle attività che esegue spesso nel validare il proprio modello di calcolo. La Validazione è forse l'attività meno svolta, non capitando spesso nella fortunata situazione di disporre di test sperimentali che permettano di controllare "la fisica" del nostro modello di calcolo (dobbiamo spesso fidarci e rispettare di buone pratiche apprese all'università, o ai Corsi post laurea), mentre demandiamo (erroneamente) la verifica del codice al produttore software e effettuiamo comunemente una verifica dei calcoli (con formule semplificate, con controlli di sensitività della mesh, con test sulle convergenze, con comparazioni con altri software).

In ogni caso è chiaro che ogni "caso prova", o benchmark, è da ritenersi valido per un determinato Modello Concettuale e Matematico, per un determinato set di Parametri Fisici e per alcuni scelti Parametri di Discretizzazione. Parlare di "certificazione" di un software, perseguita con un numero limitato di benchmarks, nell'ambito della complessità di un processo di Modeling & Simulation alla luce delle attività di Validazione e Verifica, significa illudere l'utilizzatore che le analisi condotte con tale software siano altrettanto certificate, quando invece, al massimo una parte del Code Verification è stata svolta. Ed è chiaro che ASME, IAEA, NASA, NAFEMS si guardano bene dal trattare il tema della certificazione del software e affrontano invece la validazione del processo di Modeling & Simulation.

Il ruolo del produttore di software

Alla luce del processo di V&V, il ruolo dello sviluppatore di software deve essere quello di controllare "la matematica", la robustezza degli algoritmi

(intesa come la stabilità di convergenza e la convergenza alla soluzione al $\lim \Delta \rightarrow 0$, almeno per problemi ben posti), e minimizzare la probabilità di "code bugs". Nel minimizzare la probabilità di bugs, il Produttore deve implementare un Sistema di Qualità, all'interno del quale deve avere implementato valide procedure di gestione degli errori, quando essi vengono scoperti, specialmente quando sono identificati dagli utenti. Inoltre il controllo sui bug e sulla "matematica" implementata dal codice deve essere effettuato su un numero statisticamente rilevante di "regression test" (sono decine di migliaia, nei software più qualificati), mentre i "casi prova" o benchmarks rappresentano solo la punta dell'iceberg dell'intero processo di "Code Verification", e sono utili piuttosto all'utilizzatore, come spesso sottolineato da NAFEMS. Tra i benchmarks forniti dal produttore del software si possono identificare i "Code Verification", quando comparano i risultati con formulazioni analitiche, mentre sconfinano nel "Model Verification" quando presentano comparazioni con altri software. Quando i benchmarks riproducono test reali, hanno invece a che vedere con il processo di "Validation".

Il ruolo dell'analista progettista: la preparazione

Nel valutare l'affidabilità delle analisi numeriche, un parametro deve essere la preparazione dell'analista progettista. Il livello di esperienza nell'esecuzione di analisi numeriche è fondamentale per l'analista. Questo fatto viene estesamente sottolineato nei testi di NAFEMS. I benchmarks codificati da NAFEMS costituiscono il primo step della formazione dell'analista: riprodurre dei benchmarks per la prima volta o su un software di nuovo utilizzo non è una attività semplice, porta a inaspettate sorprese ed è ricca di lezioni da trarre. Riproducendo i "casi prova", l'utilizzatore del software svolge una attività di apprendimento e di controllo del codice, egli aumenta il grado di confidenza nell'uso del software e la sua preparazione nell'affrontare specifiche analisi. Nelle sue Linee Guida, NAFEMS richiede che nella relazione di calcolo sia attestato il livello di preparazione degli analisti, specificando i curricula, i Corsi, le analisi svolte in precedenza attinenti all'analisi in questione, nonché il grado di confidenza col software utilizzato.

Regole di validazione dei modelli di calcolo

La lettura e la comprensione delle Linee Guida e Buone Pratiche già citate e facilmente reperibili sulla Rete, quali NAFEMS, NASA, ASME, FIB, IAEA, oltre alla consultazione di qualche buon libro sul tema della modellazione, consentono di stilare una lista sintetica delle attività da svolgere per una buona esecuzione delle analisi e di una loro validazione. Si rimanda ad altri testi per una trattazione più estesa.

a) Chiara definizione del flusso di M&S: indicando in premessa gli obiettivi che l'analisi si prefigge, gli aspetti del Modello Concettuale considerati e gli aspetti della realtà che si sono ritenuti non influenti, la motivazione della matematica scelta a sostegno della simulazione ed i limiti di applicabilità, gli algoritmi utilizzati ed il codice che li implementa con i relativi limiti di applicabilità. La giustificazione dei parametri fisici utilizzati e dei parametri di discretizzazione numerica (mesh, intervalli temporali, step di iterazione, parametri di convergenza) con una analisi di sensitività sugli stessi. Il modello Computazionale così ottenuto sarà oggetto di una trattazione estesa sull'interpretazione dei risultati.

b) Controllo del Modello Computazionale: sono possibili una serie di controlli sequenziali, o check list, sulla congruenza dei dati di input e di output. È consigliabile organizzare questi controlli in liste per una loro esecuzione sistematica. Una vasta letteratura elenca controlli possibili. [1] [6] [7] [8] [9]

c) Verifica del Codice di Calcolo usato: come il Produttore, alcuni ingegneri hanno l'abitudine di conservare alcuni modelli che eseguono su ogni nuova release del software al fine di controllare i risultati. Possono essere utilizzati i "casi prova" forniti dal produttore o casi sviluppati in proprio, frutto delle passate esperienze. In ogni caso una nuova release del software dovrebbe essere testata prima

di sovrascrivere la release precedente. Una release precedente dovrebbe essere mantenuta quando si necessita di esaminare i risultati di modelli molto complessi con tempi di run dell'analisi molto lunghi: i risultati infatti normalmente non saranno leggibili sulle nuove release e dovranno essere rieseguiti.

d) Verifica dei Calcoli: nel caso si possano individuare calcoli di massima ingegneristicamente significativi (semplici equilibri, strutture equivalenti, etc.) l'ingegnere è in possesso di una prova di correttezza quasi definitiva, sufficiente a validare il modello di calcolo e il software almeno in quella determinata applicazione. Nei modelli (e per gli Stati Limite) più complessi, sempre più spesso, questo non è possibile e la verifica dei calcoli è intesa come un indizio, che assieme alla Verifica del Codice, al controllo del Modello Computazionale e talvolta alla Validazione, porta ad una ragionevole prova. La Verifica dei Calcoli affronta in questo caso il lavoro sulle analisi di sensitività dei parametri di input, sulla discretizzazione del modello, al fine di identificare un asintoto di convergenza verso una soluzione stabile. Sono possibili confronti con altri software, avendo presente che ottenere il medesimo risultato non garantisce dall'aver scelto il corretto Modello Computazionale, ma solo che i due software risolvono la "matematica" allo stesso modo.

e) Validazione: è l'attività che permette, mediante test reali, di controllare la correttezza del proprio modello computazionale. Non è in discussione il testare un modello uguale a quello che si deve simulare, il che sarebbe assurdo, ma un test semplificato (una trave semplicemente appoggiata), o parti di struttura (una cerniera plastica, un giunto), che si ritengono significative per validare le assunzioni decise nell'attività di M&S. La significatività dei test è uno degli argomenti più discussi nella comunità di chi si occupa di V&V, tuttavia si è concordi nel dire che non si tratta di calibrare i Modelli Computazionali (nella Calibrazione si modulano tutti i parametri dell'analisi al fine di ottenere lo stesso risultato del test), nella Validazione i parametri sono noti, in discussione è il processo che porta ad ottenere un Modello Computazionale che riproduca fedelmente il test.

Bibliografia

- [1] NAFEMS (National Agency for the Finite Element Methods and Standards): *NAFEMS Guidelines to Finite Element Practice*. Glasgow, 1992. ISBN 0 903640 16 3
- [2] NAFEMS (National Agency for the Finite Element Methods and Standards): *NAFEMS Quality Assurance Procedures for Engineering Analysis*. Glasgow, 1999. (Disponibile su richiesta a NAFEMS)
- [3] IAEA SAFETY STANDARD SERIES. NS-G-1.6 *Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants*. Vienna, 2003
- [4] ASME (American Society of Mechanical Engineers) V&V10, Comitee. *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*. 2007
- [5] NASA Technical Standard, STD 7009. *Standard for models and simulations*. 2008
- [6] P. Rugarli: *Analisi modale ragionata*. EPC Libri, Roma 2005. ISBN 88-8184-382-X
- [7] M. Fardis: *Seismic design, assesment and retrofitting of concrete buildings*. Springer Media B.V., 2009. ISBN 978-1-4020-9841-3
- [8] G.A.Rombach: *Finite element design of concrete structures*. Thomas Telford, London 2004. ISBN 0 7277 3274 9
- [9] Perretti, Ghersi, Sattamino, Brenna: *La validazione del calcolo strutturale eseguito con computer*. Maggioli Editore, 2007. ISBN 9 788838 736728

Per approfondimenti vedi anche:

- **Validazione software:** www.cspfea.net/scheda-documento-CSP00007.html

Fiere

05/08 Ottobre 2011 - Fiera Bologna "SAIE 2011"

Per informazioni: www.saie.bolognafiere.it

05/08 Ottobre 2011 - Fiera Milano Rho "MADE Expo 2011"

Per informazioni: www.madeexpo.it

Convegni

18/22 Settembre 2011 - Politecnico di Bari: "ANIDIS 2011"

Per informazioni: www.anidis.it

FORUM DELLA TECNICA DELLE COSTRUZIONI MADE EXPO MILANO RHO FIERA Eventi a cui parteciperà CSPFea

5 Ottobre 2011 - "Progettazione Strutturale di edifici in CA di grande altezza: i materiali, i controlli e le esperienze internazionali".

La partecipazione è gratuita. Per ulteriori informazioni sul convegno: www.madeexpo.it/it/eventi_forum.php

6 Ottobre 2011 - "Tecnologie per la realizzazione di strutture antisismiche: evoluzione, validazione e progettazione". Il convegno è organizzato da EUCENTRE, la Fondazione Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica di Pavia. Nel corso del convegno ci saranno interventi tenuti da diversi esperti del settore, tra questi anche il Capo del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Dott. Franco Gabrielli.

Per ulteriori informazioni visitare il sito www.eucentre.it o scrivere a sandra.januario@eucentre.it

7 Ottobre 2011 - "Ponti e viadotti stradali: indicazioni progettuali per la valutazione geotecnica e strutturale".

La partecipazione è gratuita. Per ulteriori informazioni sul convegno: www.madeexpo.it/it/eventi_forum.php

7 Ottobre 2011 - "Aspetti normativi per la progettazione di edifici con sistemi reticolari misti acciaio/calcestruzzo ed innovazioni tecniche proposte dall'industria".

La partecipazione è gratuita. Per ulteriori informazioni sul convegno: www.madeexpo.it/it/eventi_forum.php

7 Ottobre 2011 - "La Validazione dei modelli di calcolo strutturale in zona sismica". Il convegno è organizzato dall'Associazione ISI - Ingegneria Sismica Italiana. Il programma prevede la partecipazione di rappresentanti dell'Ente Normatore, dell'Università e della Ricerca, delle aziende produttrici e dei servizi (software), e dei professionisti. Tra gli oratori, il Dott. Ing. Pietro Baraton, Coordinatore GdL Materiali e Prodotti Innovativi - Ministero Infrastrutture e Trasporti.

Per ulteriori informazioni visitare il sito www.ingegneriasismicaitaliana.it o scrivere a segreteria@ingegneriasismicaitaliana.it.

Lo stand di **CSPFea** sarà presente **dal 5 al 8 ottobre 2011** alle fiere di Milano e Bologna

www.cspfea.net/eventi



SAIE 2011

INTERNATIONAL BUILDING EXHIBITION

Bologna, 5-8 ottobre

address.it



DIAMO IMPULSO AL FUTURO DELLE COSTRUZIONI

CON TRE SPECIALIZZAZIONI ESCLUSIVE



ENERGIA, SOSTENIBILITÀ
E GREEN BUILDING



CANTIERE, PRODUZIONE,
CALCESTRUZZO



SERVIZI E SOFTWARE
PER LE COSTRUZIONI



SALONE INTERNAZIONALE DELL'EDILIZIA



Viale della Fiera, 20 - 40127 Bologna (Italia) - Tel. +39 051 282111 - Fax +39 051 6374013 - www.saie.bolognafiere.it - saie@bolognafiere.it

www.saie.bolognafiere.it