

Qualità e sicurezza delle applicazioni software nella progettazione strutturale

L'argomento può essere affrontato da diversi punti di vista. Alcune soluzioni sono obbligate, o, comunque, ormai delineate nelle linee essenziali. Altri percorsi sono del tutto nuovi, ed aperti all'evoluzione delle tecnologie software, che, in alcuni settori, sono particolarmente vivaci. Se ne discute sommariamente nel seguito.

PUNTI DI VISTA

I punti di vista che merita tenere presenti sono quelli:

- del progettista, o, comunque del professionista che opera in modo indipendente;
- dell'industria;
- dell'estensore di specifiche tecniche o normative.

Il **progettista** bada alla sostanza: sui risultati dei modelli individua le scelte strutturali ed esegue i dimensionamenti. Di questi è responsabile, quali che siano le valutazioni che egli, autonomamente, trae dal calcolo. Produrre invece, volta per volta, l'evidenza formale della correttezza del calcolo è, per lui, esigenza meno stringente.

In un'**azienda**, nello spirito di un sistema di gestione per la qualità, è importante istituire sistemi di controllo espressi attraverso procedure che - se dettagliate non solo per gli aspetti di gestione, ma anche per quelli legati alla coerenza delle calcolazioni ricorrenti - definiscano modelli di calcolo capaci di produrre, in assenza di errori materiali, informazioni di precisione sufficientemente definite in senso ingegneristico.

Per l'**estensore** di specifiche tecniche (od, eventualmente, di normativa), l'attenzione è principalmente posta alla confrontabilità delle applicazioni, ed al modo di dimostrarla. Non possono essere, infatti, misurati con un'unica regola risultati prodotti da software basati su metodi diversi, o, per uno stesso software, risultati ottenuti con modelli diversi. Già in modelli 'convenzionali' ad elementi finiti, ad esempio, cambiare le funzioni di base degli elementi, od il loro ordine di integrazione - pur senza modificare sostanzialmente la suddivisione - può portare a risultati molto diversi. Lo stesso dicasi per la definizione delle configurazioni di carico.

CATEGORIE DI SOFTWARE

I principi da applicare, pur simili nella sostanza, debbono poi essere definiti in relazione al tipo di software di cui si tratta. A questo riguardo possono essere definite sommariamente quattro categorie di applicativi:

- applicativi specialistici;
- applicativi di tipo generale;
- procedure e 'templates'
- metodi per l'esplorazione del dominio di progetto, l'ottimizzazione, ed il supporto alle decisioni.

Applicativi specialistici. Gli applicativi specialistici,

Il tema è aperto: come essere sicuri, da un lato, che nell'applicazione svolta il software non presenti errori, e dall'altro, più pressantemente, come garantire che l'applicazione sia, a tutti gli effetti, adeguatamente rappresentativa del problema che si vuole analizzare ed adatta alla progettazione che si intende sviluppare?

Quality and safety of software applications in structural design

The theme is an open one: how can we be sure, on the one hand, that in the application performed the software does not contain errors, and on the other, more importantly, how can we guarantee that the application is sufficiently representative of the problem to be analysed, in every sense, and adapted to the design that we intend to develop?

ci, sono destinati a sviluppare un calcolo particolare. Essi possono essere applicativi che l'utente stesso si costruisce, o che fanno parte del know-how aziendale, o specificamente commissionati a produttori di software, o, infine, applicativi commerciali. Essi affrontano spesso il problema implementando metodi convenzionali - e, quindi, anche di tipo analitico diretto - attraverso regole od applicando norme che sono specifiche del calcolo trattato. Per caratterizzarli si potrebbe dire che essi seguono sostanzialmente il percorso che si farebbe attraverso un calcolo manuale, automatizzandolo.

Applicativi di tipo generale. Gli applicativi di tipo generale, sono basati su approcci di tipo numerico. Appartengono a questa categoria i programmi che consentono di costruire modelli per una varietà di problemi, e per assiemi/geometrie qualsiasi. Essi sono basati su metodi di discretizzazione quali il metodo degli elementi finiti, il metodo delle differenze finite, il metodo dei volumi di controllo, il metodo per elementi al contorno, ed altri metodi, che combinano variamente approcci numerici ed analitici. Il problema è, in tutti i casi, ricondotto alla soluzione di un sistema di equazioni algebriche (o, al più, differenziali), attraverso approssimazioni di vario genere sensibili alle scelte legate alla formalizzazione del modello (tra cui la stessa discretizzazione).

Procedure e 'templates'. Procedure, maschere per la facilitazione nella costruzione dei modelli, 'templates', sono, in senso stretto, interfacce poste tra l'utente ed uno o più applicativi - di tipo generale, specialistico o misto - per guidare la costruzione del modello ed il calcolo, semplificando (od accelerando) l'attività. Possono essere molto rigorose - e, quindi, non lasciare scelte all'utente - o relativamente flessibili - e capaci, quindi, di trattare le condizioni poste dall'utente, ad esempio sulla precisione.

Metodi per l'esplorazione del dominio di progetto. Alla categoria dei metodi per l'esplorazione del dominio di progetto, l'ottimizzazione, e il supporto alle decisioni appartengono tecnologie software avanzate - molto recenti e destinate pro-

tabilmente a segnare l'evoluzione dei software di settore - progettate per gestire in modo automatico serie di modelli variamente parametrici, in sequenze non prestabilite ma individuate progressivamente verso obiettivi di ottimo fissati dall'utente.

Per non estendere troppo la discussione, ci si limita qui a trattare il problema dei software appartenenti alla seconda categoria (applicativi di tipo generale).

Appartengono infatti a questa categoria la maggior parte dei software commerciali, ed i metodi impiegati sono quelli su cui vi è più lunga tradizione e maggior cultura tra gli utilizzatori. Parlando poi di calcolo meccanico-strutturale, si può restringere il campo al metodo degli elementi finiti, nella formulazione 'classica' cosiddetta di tipo 'h'.

CRITERI GENERALI DI VALUTAZIONE, RISPETTO AI PRODUTTORI DEI SISTEMI SOFTWARE

Tra i criteri generali - la cui applicabilità si estende a tutti i sistemi software più sopra descritti - si citano, su fronte dei produttori del software, i seguenti.

Documentazione

Il software deve essere anzitutto documentato, in maniera completa e non equivoca.

I metodi numerici, quali il metodo degli elementi finiti, sono metodi maturi e del tutto consolidati. Le scelte seguite per l'implementazione possono essere, quindi, caratterizzate senza possibilità di malintesi: le funzioni di forma sono categorizzate, le leggi di integrazione sono pressochè unificate, le leggi ed i modelli costitutivi sufficientemente definiti, gli algoritmi di soluzione organizzati su schemi (e relativamente a teoremi) classici. Con modeste eccezioni - quali modelli per applicazioni non-lineari avanzate, o qualche formulazione per elementi particolari, ad esempio nella categoria dei gusci - quello che si implementa, e che riguarda la quasi totalità delle applicazioni condotte nella progettazione 'reale', non può lasciare margini d'ombra: è software, e ben preciso, non magia. E non va trattato come magia. Non si deve accettare che il software poggi su segreti che - nella logica spesso fuorviante della proposta commerciale - suggeriscono, senza chiarirla, l'idea di vantaggi rispetto alla concorrenza.

Si deve capire che non c'è niente di nuovo né di straordinario: semplicemente alcune scelte impostative sono più adatte a certe applicazioni, altre più adatte ad altre.

Dimostrazione di correttezza di funzionamento

Deve essere provato il funzionamento corretto del software.

Questa esigenza deve però essere intesa rispetto all'utilità pratica e, in generale, al buon senso dell'applicatore. Non è possibile accertare le prestazioni del software in tutti i casi: le combinazioni ed i modelli realizzabili sono, infatti, infiniti. La strada praticabile è quella dei cosiddetti 'benchmark', vale a dire dei problemi test per accertare le prestazioni.

Sui benchmark da svolgere nei diversi campi la bi-

bliografia è molto vasta. Si cita, in particolare, il lavoro svolto dalla NAFEMS, l'associazione internazionale che si interessa dell'applicazione corretta dei software destinati all'uso ingegneristico (www.nafems.it).

La quantità e la qualità dei benchmark sviluppati è notevolissima, e così il lavoro di costante aggiornamento e documentazione. Sono trattati sia i benchmark fondamentali, relativi ai presupposti di base dei metodi, che benchmark specialistici ed avanzati. A titolo di esempio, il benchmark fondamentale per l'analisi statica nel continuo è il cosiddetto 'patch test'. Esso discende dal principio che, quale che sia la scelta (arbitraria) delle funzioni di base di un elemento finito, esse devono essere in grado di descrivere uno stato di deformazione costante (stato di riferimento, corrispondente ad una situazione fisica inequivocabile).

Per applicare il test basta, quindi, suddividere in modo arbitrario un continuo, e assegnare una condizione che produca uno stato di deformazione costante, vedendo se questa circostanza è poi verificata (analisi dello stato tensionale). Se il test non passasse, l'applicabilità, in generale, del software sarebbe alquanto critica: anche se l'evidenza del mancato soddisfacimento del requisito può non essere indicativa di errore, la violazione del principio rende il software non riconducibile ai canoni di controllo documentati.

La qualificazione attraverso benchmark è la strada universalmente scelta: oggi, quasi tutti i progetti di ricerca nel settore (si vedano ad esempio le reti europee quali FENET o MACSInet) hanno come prodotto importante la realizzazione di cataloghi di benchmark o, più in generale, di applicazioni di riferimento. Riferimenti bibliografici per l'esecuzione di benchmark per vari tipi di solutori sono riportati alla fine dell'articolo (fonte: Straus7 VERIFICATION MANUAL)

Correzione degli errori ed assistenza agli utenti

Il produttore del software deve saper reagire con rapidità alla segnalazione di errori; sviluppare eventuali 'workarounds' temporanei; suggerire soluzioni per applicazioni particolari. A parole questo sembrerebbe naturale e dovuto. Nella realtà spesso non è così.

Implementazione in qualità.

Da ultimo il produttore del software dovrebbe operare entro un sistema di gestione per la qualità. Quest'aspetto è particolarmente importante per le case di software di maggior dimensione, che rischiano di produrre, diversamente, sviluppi incontrollati.

CRITERI GENERALI DI VALUTAZIONE, RISPETTO AGLI UTILIZZATORI DEI SISTEMI SOFTWARE

Sul fronte degli utilizzatori, i criteri da utilizzare sono pressochè simmetrici. In particolare si richiamano i seguenti.

Ruolo delle conoscenze

Il ruolo fondamentale è quello delle conoscenze, e, con esso, la capacità di autocritica. E' un paradosso

pensare che quanto più sofisticato sia lo strumento che si utilizza, tanto più facile sia adoperarlo. E', ovviamente, vero il contrario. La formazione istituzionale fornisce normalmente una base sufficiente quanto ai riferimenti dei metodi. Non può, però, per sua natura, condurre sino all'applicazione, rispetto alle diverse esigenze della professione e dell'industria. Né è in grado di adattarsi rapidamente all'evoluzione degli strumenti commerciali.

E' fondamentale la formazione continua, o, comunque, la possibilità di accedere a servizi di consulenza qualificati. Si richiama, al riguardo, nuovamente l'impostazione seguita dalla NAFEMS, o la recentissima iniziativa del consorzio TCN: fondato da Centro Ricerche Fiat, CRS4 (Cagliari), ITC-IRST (Trento), Engin Soft (Trento), il consorzio ha per oggetto "la promozione di attività di formazione, ad alto contenuto qualitativo, relativamente alle discipline che afferiscono alla simulazione numerica e ne rendono utilizzabili le applicazioni nell'ingegneria e nell'industria: sia, quindi, discipline di base della matematica applicata, dell'ingegneria e dell'informatica, che tecnologie specifiche per la sperimentazione virtuale, il CAE, la simulazione di processo e di prodotto, che, infine, discipline trasversali legate alla statistica, alle strutture di dati, alla loro comunicazione ed all'ingegneria del software in generale". La miglior garanzia di una corretta applicazione è la competenza di chi la svolge. Tra le iniziative finalizzate ad accertare questa competenza e confermarla nel tempo, si richiama il "Registro Europeo dell'Analista Certificato", strutturato su direttive della NAFEMS entro una procedura di accertamento sostenuta da DNV.

Esecuzione di applicazioni prova.

La ripetizione di benchmark è pure fondamentale. L'impostazione può essere diversa per il libero professionista e per l'industria. Il primo dovrebbe accertare, con applicazioni semplici e di risultato noto, che il software si presta a trattare modelli nel settore di proprio interesse, evitando di introdurre complicazioni inutili, o di impiegare funzionalità che non siano state testate separatamente. Una volta impostato coscientemente e validato un procedimento di calcolo, lo dovrebbe mantenere per tutti i casi simili.

Corrispondentemente il principio da seguire nella scelta di un software è che esso ha valore se svolge le funzioni di cui si ha bisogno rispetto alla quotidianità della propria attività, e non perché presenta una serie estesissima di possibilità, che non verranno probabilmente mai utilizzate.

Nell'industria – e nel relativo sistema di gestione per la qualità – dovrebbe essere più estesamente programmata una sequenza di benchmark da ripetere ogniqualvolta i sistemi software vengono aggiornati.

Verifica dei risultati attraverso calcolazioni alternative

Ogni calcolo va accertato, per quanto possibile, con metodi alternativi, quantomeno basati sul calcolo convenzionale. L'esperienza professionale, nel settore in cui il software è applicato, è fondamentale. Si rischia, diversamente, di produrre il paradosso di scelte ottimali in progetti pessimi.

Direttive di modellazione

Per quanto possibile dovrebbero essere formulate direttive di modellazione. Esse sono il modo più efficace per tenere sotto controllo la qualità del risultato, ovvero il suo livello di approssimazione. Purtroppo la tendenza non è sempre in questa direzione. Il mercato è mosso, infatti, da una domanda che lo può disorientare: ridurre al massimo il lavoro-uomo, e trasferirlo in lavoro-computer. Si pensi, a livello elementare, al problema della cosiddetta 'meshatura automatica'. Il passaggio è fondamentale. Ma come lo si svolge? Alcuni software suggeriscono addirittura soluzione 'meshless', o soluzioni in cui la "meshatura" nemmeno è resa evidente. Come si fa a controllare il risultato? Come si fa a garantire la convergenza verso la soluzione esatta se se ne violano apertamente i teoremi?

ESEMPLIFICAZIONI

I criteri accennati sono, come detto più sopra, di carattere generale. In molti casi sono addirittura considerazioni del buon senso comune.

Essi sono, però, particolarmente importanti – ed a volte critici – proprio per i programmi di tipo generale, principale oggetto di questa discussione. Un programma di tipo generale si presta, infatti, a gestire virtualmente quasi ogni tipo di problema in una vastissima categoria di applicazioni, purché se ne sappia immaginare un modello descrittivo.

A titolo di esempio si voglia affrontare il problema dell'analisi elasto-plastica di strutture intelaiate piane. Un software di riferimento per questo tipo di applicazioni è il codice PEP, prodotto dall'ente francese C.T.I.C.M. (CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE).

Nella documentazione relativa al software – che è, più in generale, una documentazione relativa all'approccio a questo problema, anche in relazione allo sviluppo delle normative europee di pertinenza – il C.T.I.C.M. propone alcuni esempi che possono essere utilizzati come benchmark ideali per codici che svolgono analisi non-lineari utilizzando ossature strutturali rappresentate con elementi trave. Gli esempi riportati di seguito sono stati riprodotti utilizzando il codice di calcolo STRAUS, e valgono, quindi, come benchmark dimostrativi dell'applicabilità del software in questo settore. Si presentano, in particolare, due esempi:

Portale industriale a due campate

Si tratta di un capannone a due navate, analizzato tenendo conto della possibile plasticizzazione delle sezioni delle membrature, sia per quanto riguarda il comportamento flessionale delle travi, sia per quanto riguarda quello assiale. Le leggi relative sono date in forma tabulare come legge momento-curvatura (del tipo elastico-perfettamente plastico, con massimo corrispondente al momento di completa plasticizzazione) e legge tensione assiale/deformazione. I carichi sono applicati attraverso uno schema di riferimento (figura 1), ed amplificati fino al raggiungimento del collasso, individuato dalla formazione di un meccanismo labile.

I risultati ottenuti con Straus7 coincidono con quelli pubblicati dal CTICM (figg. 2, 3, 4).

Telaio a 2 piani

Trattasi di un edificio a due piani e campata singola, in cui agli effetti non-lineari schematizzati con leggi momento-curvatura o con leggi tensione assiale-deformazione si sommano effetti geometrici (tipo P-Delta).

Inoltre è stata adottata una legge non lineare (elastica perfettamente plastica) per le connessioni a momento tra trave e colonna ed una legge non-lineare per il cedimento della fondazione. Anche in questo caso i risultati coincidono con quelli pubblicati dal CTICM (figg. 5, 6 e 7).

Le curve non lineari momento-rotazione per le

connessioni trave-colonna e forza spostamento per il terreno, assumono inoltre la seguente forma analitica:

$$D = \frac{(F/S_0)}{\left[1 - \left(\frac{F}{F_0}\right)^2\right]}$$

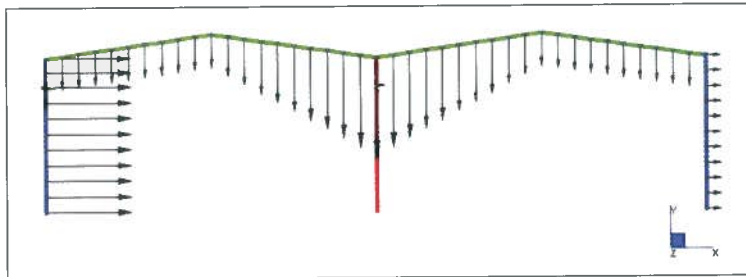


Figura 1 - Modello in Straus7 con i carichi applicati

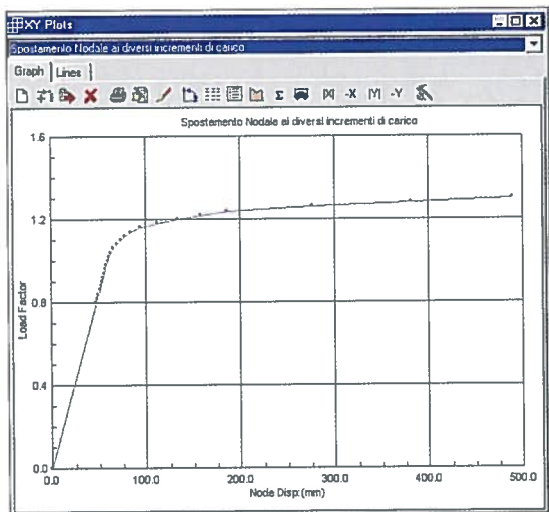


Figura 2 - L'andamento dello spostamento orizzontale di uno dei nodi rispetto all'incremento del carico.

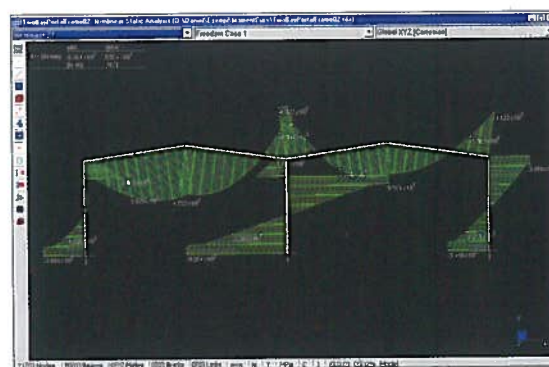


Figura 3 - Il diagramma del momento flettente al collasso, dove risultano evidenti le cerniere plastiche formatesi.

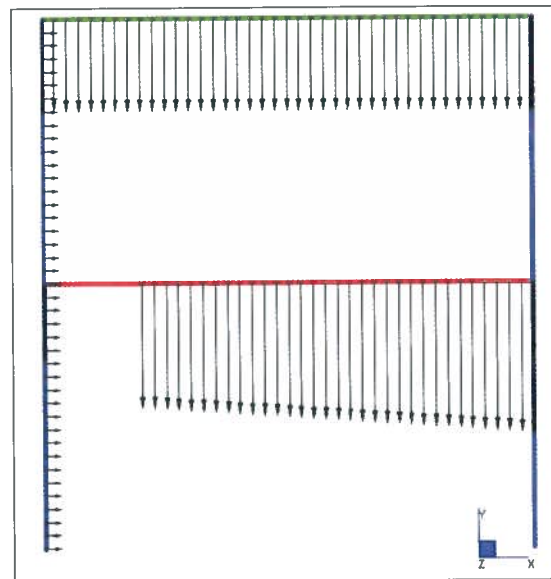


Figura 5 - Modello con carichi distribuiti e concentrati.

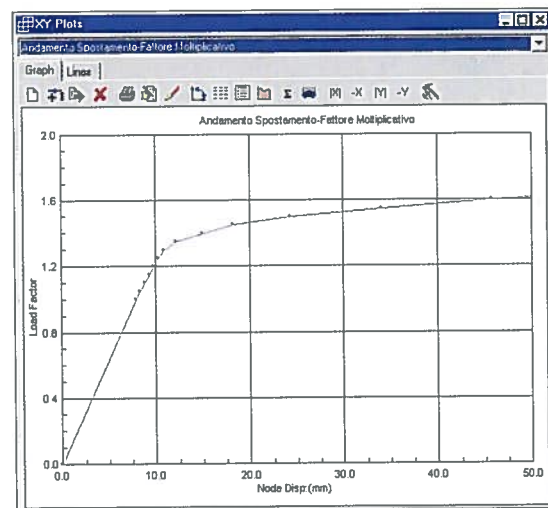


Figura 6 - L'andamento dello spostamento di uno dei nodi rispetto all'incremento del carico.

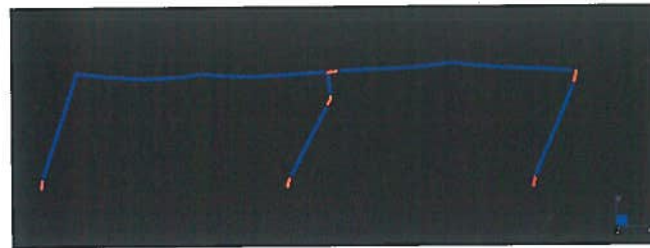
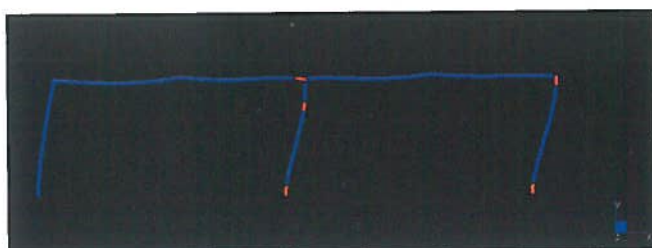


Figura 4 - La deformazione del telaio sotto carico può essere meglio apprezzata nel sito www.campiello.it/hsh dove è possibile, con l'animazione, seguire il comportamento della struttura all'aumentare del moltiplicatore dei carichi esterni. Le parti in rosso corrispondono a tratti in cui il momento flettente ha raggiunto il suo valore plastico. Le parti in blu si trovano in campo elastico. (QUESTA FIGURA LA DEVO INVIARE IO)

Dove,

- F_u rappresenta il valore dell'asintoto orizzontale della curva, e cioè la massima capacità flettente della connessione o la massima reazione del terreno.
- S_0 la rigidezza iniziale, ovvero la tangente alla curva nell'origine.
- α qualifica il tipo di raccordo tra le due rette definite dai parametri suddetti.

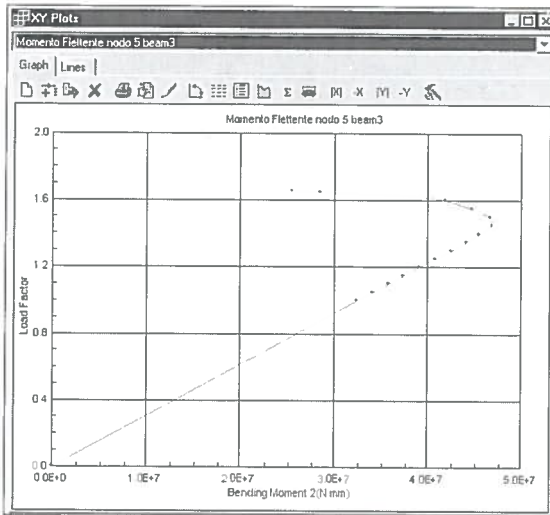


Figura 7 - L'andamento del momento flettente nel nodo 5 rispetto all'incremento del carico.

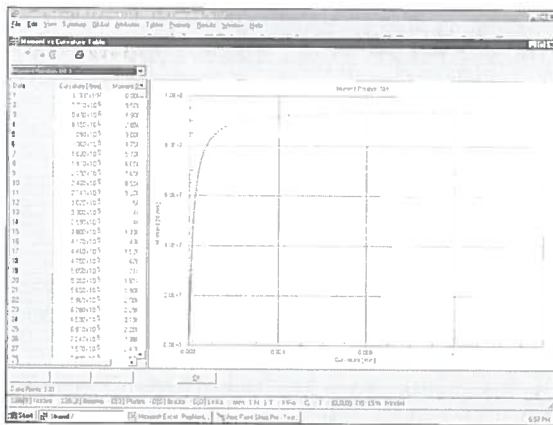


Figura 8 - Diagramma momento-rotazione alla giunzione trave colonna.

SOLUTORE LINEAR STATIC

References

1. G.A.O. Davis, R.T. Fenner and R.W. Lewis (editors), *Background to Benchmarks*, NAFEMS, Glasgow, UK, 1993.
2. NAFEMS, *Proposed NAFEMS Linear Benchmarks (LBM Rev2)*, Glasgow, 1986.
3. D. Hitchings, *Linear Static Benchmarks (LSB2)*, NAFEMS, Glasgow, UK, 1987.
4. R.H. MacNeal and R.L. Hander, *A proposed standard set of problems to test finite element accuracy*, *Finite elements in analysis and Design*, 1, 3-20, 1985.
5. W.A. Nash, *Theory and problems of Strength of Material* (2nd edition), McGraw-Hill, New York, 1977.
6. A.S. Hall, *An Introduction to the Mechanics of Solid*, Wiley, 1984.
7. H.C. Chen, *A simple quadrilateral shear panel element*, *Communications in applied Numerical Methods*, 8, 1-17, 1992.
8. S.P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells* (2nd edition), McGraw-Hill, N.Y. 1970.
9. F.P. Beer and E.R. Johnston, Jr, *Mechanics for Engineers, Statics* (4th edition), McGraw-Hill, N.Y. 1987.
10. ANSYS *Verification Manual*, Swanson Analysis Systems, Inc. 1993.
11. E. Hinton and D.R.J. Owen, *Finite Element Software for Plates and Shells*, Pineridge Press, Swansea, U.K. 1984.

SOLUTORE LINEAR BUCKLING

References

1. S.P. Timoshenko and J.M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, N.Y., 1961.
2. G. Steven and H. Ma, *Studies on buckling analysis of thin-walled structures*, *Proceedings of International Conference on Computational Methods in Engineering*, 11-13 November 1992, Singapore.
3. R.J. Roark and W.C. Young, *Formulas for Stress and Strain* (4th edition), McGraw-Hill, 1976.
4. G.B. Chai and K.H. Hoon, *Buckling of generally laminated composite plates*, *Composite Science and Technology*, 45 (1992), 125-133.

SOLUTORE NON-LINEAR STATIC

References

1. NAFEMS, *Non-Linear Benchmarks* (Report No, NNB), Glasgow, UK, 1989.
2. A.A. Becker, *Background to Finite Element Analysis of Geometrical Non-linearity Benchmarks*, NAFEMS, Glasgow, UK.
3. K. Mattiasson, *Numerical results from large deflection beam and frame problems analysed by means of elliptic integrals*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, pp 145-152, 1980.
4. A.A. Becker, *Background to Material Non-Linearity Benchmarks* (Report R0049), NAFEMS, Glasgow, UK.
5. D. Linkens, *Selected Benchmarks for Material Non-Linearity*, NAFEMS, Glasgow, 1993.
6. E. Hinton and M.H. Ezatt, *Fundamental Tests for Two and Three Dimensional Small Strain, Elastoplastic Finite Element Analysis*, NAFEMS, Glasgow, UK April 1987.
7. NAFEMS, *Nonlinear Benchmarks*, Glasgow, UK, 1989.
8. S.L. Chan, *Large deflection kinematic formulations for three-dimensional framed structures*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 95, 17-36, 1992.
9. ANSYS *Verification Manual*, Swanson analysis systems, Inc. 1993.
10. MSC/NASTRAN *Demonstration Problem Manual*, The MacNeal-Schwendler Corporation, L.A. June 1983.
11. MSC/NASTRAN *Handbook for Non-Linear Analysis*, The MacNeal-Schwendler Corporation, L.A., August 1991.
12. K.S. Surana, *Geometrically nonlinear formulation for the curved shell elements*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19, 581-615 (1983).
13. C.S. Gray et al. *Steel Designers' Manual* (2nd edition), Crosby Lockwood and Son Ltd, London, 1962.
14. LUSAS *Examples Manual*, FEA Ltd., September 1987.
15. FLAC *Verification Problems*, Itasca Consulting Group Inc. 1999.
16. K.-J. Bathe, E.L. Wilson and R.H. Iding, *NONSAP - A Structural analysis Program for Static and Dynamic Response of Nonlinear Structures*,

Report No. SESM 74-3, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, January 1974.

17. J.T. Oden and T. Sato, *Finite strains and displacements of elastic membranes by the finite element method*, International Journal for Solids and Structures, vol. 3, 471-488 (1967).
18. F. Gruttmann and R.L. Taylor, *Theory and finite element formulation of rubber-like membrane shells using principle stretches*, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 35, 111-1126, (1992).
19. Y. Basar and Y. Ding, *Finite-element analysis of hyperelastics thin shells with large strains*, Computational Mechanics, Vol. 18, 200-214 (1996).
20. C.H. Liu, G. Hofstetter and H.A. Mang, *3D finite element analysis of rubber-like materials at finite strains*, Engineering Computations, Vol. 11, 111-128 (1994)

SOLUTORE NATURAL FREQUENCY

References

1. F. Abassian, D.J. Dawswell and N.C. Knowles, *Selected Benchmarks for Natural Frequency Analysis*, NAFEMS Report SBNFA, Glasgow, November, 1987.
2. C.H. Edwards, Jr and D.E. Penney, *Elementary Differential Equations with Boundary Value Problems* (3rd edition), Prentice-Hall, N.J. 1993.
3. W.W. Seto, *Theory and Problems of Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, N.Y., 1964.
4. ANSYS *Verification Manual*, Swanson Analysis Systems, Inc. 1993.
5. R.W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures* (2nd edition), McGraw-Hill, 1993.

SOLUTORE HARMONIC RESPONSE

References

1. J. Maguire, D.J. Dawswell and L. Gould, *Selected Benchmarks for Forced Vibration*, NAFEMS (R0016), Glasgow, UK 1990.
2. ANSYS *Verification Manual*, Swanson Analysis Systems, Inc. 1993.
3. G.B. Warburton, *The Dynamical Behaviour of Structures* (2nd edition), Pergamon, Oxford, 1976.

SOLUTORE SPECTRAL RESPONSE

References

1. J.M. Biggs, *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, 1964.
2. A.H. Barbat and J.M. Canet, *Structural Response Computations in Earthquake Engineering*, Pineridge Press, Swansea, UK 1989.
3. R.W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures* (2nd edition), McGraw-Hill, 1993.
4. W.T. Thomson, *Theory of Vibration with Applications* (4th edition) Chapman & Hall, London, 1993.

SOLUTORE NON-LINEAR TRANSIENT

References

1. MSC NASTRAN *Handbook for Non-Linear Analysis*, The MacNeal-Schwendler Corporation, L.A., August 1991.
2. ANSYS *Verification Manual*, Swanson Analysis Systems, Inc. 1993.

SOLUTORE STEADY STATE HEAT TRANSFER

References

1. J. Barlow, G.A.O. Davis, *Selected FE Benchmarks in Structural and Thermal Analysis*, NAFEMS, Glasgow, UK, October 1987.
2. J.P. Holman, *Heat Transfer* (S.I. metric edition), McGraw-Hill, 1989.
3. R.W. Lewis, "First 3-D Heat Transfer Benchmarks Completed", Benchmark, July 1990, p 9-12.

SOLUTORE TRANSIENT HEAT TRANSFER

References

1. J. Barlow, G.A.O. Davis, *Selected FE Benchmarks in Structural and Thermal Analysis*, NAFEMS, Glasgow, UK, October 1987.
2. J.P. Holman, *Heat Transfer* (S.I. metric edition), McGraw-Hill, 1989.
3. D.R. Pitts and L.E. Sissom, *Theory and Problems of Heat Transfer* (Schaum's Outline Series), McGraw-Hill, New York, 1977.

BIBLIOGRAFIA

1. R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", Third Edition (1989) J.Wiley
2. O.C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method" (1977), Mc-Graw Hill
3. E. Hinton and D.R. J. Owen, "An Introduction to Finite Element Computations", Pineridge Press, (1980)
4. O.C. Zienkiewicz and K. Morgan "Finite element and Approximation" John Wiley, (1983)
5. R.L. Taylor, P.I. Beresford and E.L. Wilson, "A Non-conforming Element for Stress Analysis". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, 1211-1219 (1976).
6. R.W. Clough and C.A. Felippa, "A Refined Quadrilateral Element for Analysis of Plate Bending". Proceeding of the Second conference on Matrix Methods in Structural Mechanics. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. AFFDL-TR-68-150(1968).
7. Hou-Cheng Huang, "Static and Dynamic analysis of Plates and Shells: Theory, Software and applications". Springer-Verlag (1989).
8. P. Jetteur and F. Frey, "A Four Node Marguerre Element for Non-Linear Shell Analysis". Engineering Computations, Vol. 3, N. 4 (1986).
9. R.H. MacNeal and R.L. Harder, "A Proposed Standard Set of Problems to Test Finite Element Accuracy". Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 1, (1985) pp 3-20.
10. Parder A. "A Proposed Standard Set of Problems to Test Finite Element Accuracy". Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 1, (1985) pp 3-20.
11. J.M. Whitney, I.M. Daniel and R.B. Pipes, "Experimental Mechanics of Fibre Reinforced Composite Materials" Soc. Exp. Stress Analysis Monograph 4, Prentice-Hall (1982).
12. B.D. Agarwal and L.J. Broutman, "Analysis and Performance of Fibre Composites" John Wiley & Sons, (1980).
13. S.W. Tsai, "Composites Design", Think Composites, (1985).
14. Roark and Young, "Formulas for Stress and Strain".
15. G.H. Warburton, "The Dynamical Behaviour of Structures" Second Edition, Pergamon (1976).
16. S.P. Timoshenko and S. Woinowsky-Kreiger, "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill (1959).
17. G.P. Steven "Automatic Generation of finite Elements", Aero Tech. Note 7405, Dept. Of Aeronautical Engineering, University of Sydney, (Sept. 1974).
18. Carslaw & Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, 2nd Edition (1986).
19. W. Ramberg & W.R. Osgood, "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters" NA-CA Technical Note No. 902.
20. G. Carè and G.P. Steven, "A Tree Sorting algorithm for the Minimisation of Finite Element Matrix Bandwidths", Proceedings of Sixth International Conference Australia on Finite Element Methods Vol. 2.
21. MIL-HDBK 5H, U.S.: Military Standards Handbook, Number 5.
22. AUTOCAD Release 11, Reference Manual, Autodesk (1990).
23. IGES Specification, Document NBSIR 88-3813, U.S. National Bureau of Standards.
24. J.P. Holman, "Heat Transfer" McGraw-Hill, 3rd Edition, (1972).

TESTI DI CONSULTAZIONE

1. R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", Third Edition (1989) J.Wiley and Sons.
Fornisce uno stato dell'arte introduttivo generale della teoria degli elementi finiti. Misto di matematica ed applicazioni, questo testo fornisce molti consigli pratici sulle tecniche di modellazione e sul calcolo.
2. O.C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method in Engineering Science" (1971), Mc-Graw Hill.
Testo teorico avanzato sul metodo degli elementi finiti, più adatto ai teorici del metodo che agli analisti. Parte della teoria di base può essere di aiuto alla comprensione della matematica del metodo.
3. B. Irons, N. Shrive, "Finite Element Primer".
Una buona introduzione pratica alla teoria di base del metodo. Sono enfatizzate le trappole in cui chi inizia con applicazioni FEM può cadere.
4. D.R.J. Owen, E. Hinton, "Finite Elements in Plasticity - Theory and Practice (1980) Pineridge Press.
Contiene la descrizione dell'applicazione del metodo degli elementi finiti alla soluzione di problemi elastoplastici. È dato spazio principalmente alla teoria matematica ed agli aspetti di sviluppo del software. Vi sono alcuni esempi di utilità pratica.
5. D.R.J. Owen, E. Hinton, "A simple guide to finite elements" (1980) Pineridge Press.
Descrive la teoria dell'analisi strutturale mono e bidimensionale, e di problemi tecnici. Il testo è sostanzialmente teorico, con esempi di programmazione, ma vi sono anche alcuni esempi di utilità pratica.
6. NAFEMS "NAFEMS Background to Benchmarks" (1993).
Il volume costituisce l'introduzione alla filosofia delle prove per la valutazione delle prestazioni ("benchmark") del software e delle tecniche di modellazione. Vi sono discussi metodi per la valutazione delle analisi, e posti in luce molti errori ricorrenti in applicazioni degli elementi finiti. Il volume ha un grande valore istruttivo, e contiene una quantità di semplici test, con le loro risposte teoriche. Leggendolo si può migliorare la propria comprensione dei programmi di calcolo e del metodo.
7. NAFEMS "NAFEMS Guidelines to Finite Element Practice" (1992).
Testo di facile lettura che discute molte tecniche comuni di analisi e modellazione. Consente di comprendere gli aspetti fondamentali dei metodi impiegati nelle aree comuni di applicazioni dell'analisi strutturale mediante elementi finiti.
8. NAFEMS "NAFEMS A Finite Element Dynamics Primer" (1992).
Ampia ed approfondita introduzione all'analisi dinamica con il metodo degli elementi finiti. Testo di facile lettura e con i riferimenti matematici essenziali consente di acquistare la confidenza necessaria per svolgere analisi dinamiche anche con modelli complessi. (Disponibile anche in italiano).
9. NAFEMS "NAFEMS A Finite Element Primer" (1992).
Ampia introduzione a tutte le aree di applicazione del metodo degli elementi finiti, tra cui problemi lineari, non-lineari, dinamici e di campo. Vi si considerano sia la teoria di base, che le tecniche di modellazione, di controllo dei modelli e di validazione. I riferimenti matematici sono limitati all'essenziale.
10. NAFEMS "NAFEMS Introduction to Nonlinear Finite Element analysis" (1992).
Eccellente introduzione all'esteso campo delle applicazioni non-lineari, tratta sia gli aspetti della non-linearità geometrica che della non-linearità per materiale, con discussioni relative alle aree specialistiche all'interno di queste. Tra tutti i testi di NAFEMS, questo è certamente il più teorico e ricco di matematica, pur risultando di lettura ancora relativamente facile rispetto all'elevata complessità dei settori applicativi trattati.
11. K.C. Rockey et. Al. "The Finite Element Method - A Basic Introduction for Engineers" 2nd Edition (1983) Collins.
Introduzione di base alla teoria degli elementi finiti. Sono discussi i concetti fondamentali e le origini del metodo, presentandone la matematica in modo semplice, chiaro e di facile lettura. Il testo riguarda l'analisi lineare di travi, piastre ed elementi tridimensionali.
12. B. Nath, "Fundamentals of Finite Elements for Engineers" (1974) Athlone Press.
Simile ad [11] fornisce un'introduzione matematica del metodo.
13. R.D. Cook, "Finite Element Modeling for Stress Analysis" (1995) J.Wiley and Sons.
Fornisce una introduzione alla teoria degli elementi finiti, oltre che molte regole pratiche riguardo le tecniche di modellazione e di simulazione di casi riguardanti la pratica costruttiva.