

Il calcolo strutturale ad elementi finiti per la progettazione industriale: metodi e requisiti in ottica di delibera virtuale. (20h)

Enrico Bertocchi
Febbraio 2017

ver. 006

Lezione 1: mercoledì 8/2, 8÷12, 4h

Richiami di teoria dell'elasticità:

- tensioni
- deformazioni e compatibilità
- equilibrio
- legame costitutivo
- Stati piani di tensione/deformazione
 - discussione fenomenologia
 - legame costitutivo

Cenni al problema delle grandi deformazioni.

Richiami di teoria della trave

- sforzo normale e flessione
- torsione (sezioni in parete sottile aperta, chiusa e a celle multiple)
- taglio
 - sezioni in parete sottile aperte
 - determinazione del centro di taglio
 - sezioni in parete sottile chiuse
- effetto Vlasov su travi in parete sottile a torsione;
- esempio applicativo: il profilato a sezione rettangolare in parete sottile.

Il teorema di Castigliano per il calcolo di frecce e rotazioni.

Un esempio di calcolo strutturale secondo teoria della trave, svolto con l'ausilio del manipolatore algebrico.

Materiale didattico di riferimento:

- Madhukar Vable, Mechanics of Materials, Second Edition, Michigan Technological University [11r001], estratti;
- Appunti di “Strutture e materiali aerospaziali 1”, corso tenuto dai proff. Giavotto e Anghileri, compilati a cura di M. Bucca [11r002], estratti;
- Antonio Strozzi, Costruzione di Macchine, estratto dal capitolo di richiami di teoria dell'elasticità [11r003];
- Carlos Felippa, dispense delle lezioni del corso “Intro to Aerospace Structures”, estratti [11r004];
- Enrico Bertocchi, Slide teoria della trave, corso di Progettazione del telaio [11r005].

Casi presentati e discussi:

- risoluzione di una struttura staticamente non determinata: telaietto a torsione [11r006].
- modellazione a piastre di giunto complesso [11r007];
- profilato in parete sottile a torsione: sezione aperta/chiusa e influenza restrizione warping ai terminali [11r008].
- esercizio svolto e commentato da Roark, Formulas for stress and strain, 7th ed., p. 361 sgg.

Per approfondimenti:

- Manuali di progettazione di strutture aerospaziali *pre* elementi finiti [11r009]:
 - STRESS ANALYSIS MANUAL, editor Gene E. Maddux, [US] Air Force Flight Dynamics Laboratory, edizione 1986
 - Grumman's structure manual, Grumman Aerospace Corporation, redazione 1980.
 - NASA *astronautic structures manual*, 1975
- Libri di riferimento per strutture leggere:
 - T.H.G. Megson, *Introduction to Aircraft Structural Analysis*, Butterworth-Heinemann, 2013.
 - T.H.G. Megson, *Aircraft Structures for Engineering Students*, Butterworth-Heinemann, 2016.

Lezione 2 - venerdì 10/2, 13÷15, 4h

Una pragmatica introduzione al metodo

- l'elemento quadrilatero isoparametrico 4 nodi
 - funzioni di forma e mappatura isoparametrica
 - campo degli spostamenti, deformazioni, tensioni, energia interna
 - matrice di rigidezza dell'elemento
 - carichi distribuiti
- carichi concentrati e vincoli
- note sulla risoluzione numerica delle equazioni di equilibrio
- i vincoli cinematici interni (collegamenti rigidi, snodi...):
 - relazioni di dipendenza e risoluzione dei conflitti

L'elemento finito piastra/guscio quadrilatero 4 nodi.

- teoria delle piastre sottili, con estensione ai laminati in materiale composito
- implementazione ad elementi finiti della teoria delle piastre alla Mindlin.

Materiale didattico di riferimento:

- Boresi, Schmidt, *Advanced Mechanics of Materials*, 6th Edition, Wiley, capitolo 19, “Finite Element Methods” [12r001];
- Antonio Strozzi, Costruzione di Macchine, estratto dal capitolo di elementi finiti [12r002];
- *MSC.Marc 2013.1 Element Library*, estratto [12r003];
- V. Giavotto, Teoria delle piastre sottili, dispense [12r004];
- E.B., Razionalizzazione fenomenologia dello shear locking [12r006];
- Articoli storici relativi allo sviluppo della teoria degli elementi shell [12r011];

Casi presentati e discussi:

- Illustrazione modi deformativi piastra alla Mindlin [12r005];
- Analisi di convergenza del metodo [12r007];
- Analisi comparativa di varie modellazioni per la trave a flessione [12r008];
- Moto di drilling in elementi piastra ovvero trova le differenze [12r009];
- Dimostratore didattico link RBE2 vs RBE3 [12r010];
- Dimostratore didattico elemento shell quadrilatero [12e012];
- Variazione della rigidezza di un componente complesso al variare dello spessore di parete [12r013];

Lezione 3 - mercoledì 15/2, 8÷12, 4h

Valutazioni di ammissibilità dello stato tensionale/deformativo multiassiale

- Teorie della tensione ideale (=equivalente) per sollecitazioni statiche;
- Deformazione equivalente ed estensione multiassiale della caratterizzazione elasto-plastica del materiale;
- stati multiassiali di tensione/deformazione: condizioni di criticità per sollecitazioni affaticanti; il criterio di Dang Van;

Condizioni di singolarità della soluzione elastica / elastoplastica

- casistica classica
- risposta dei modelli FEM in presenza di singolarità tensionali/deformative
- gestione delle singolarità in modelli FEM

Interpretazione critica dei risultati ed esempi di errata applicazione del metodo degli Elementi Finiti.

Materiale didattico di riferimento:

- Antonio Strozzi, Costruzione di Macchine, estratto dai capitoli sulla fatica e sulle tensioni ideali [13r001];
- dispense su fatica dei proff. Fatemi e Socie, da efatigue.com [13r002];
- R. Patin, slide corso *Metal Fatigue* [13r003];
- Contributi di G.B. Sinclair su fenomeni di singolarità in corpi deformabili (articoli di review e indicazioni per l'analisi FEM) [13r004];
- MIL-HDBK-5H, *Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures*, 1998 [13r007];
- NAVAIR 01-1A-13, HJ Grover, *Fatigue of Aircraft Structures*, 1966 [13r007].

Casi presentati e discussi:

- Transizione da condizione non singolare a condizione singolare su trave incastrata a sbalzo, da modellazione FEM [13r005];
- Esempio di mala modellazione FEM per fenomeni di singolarità tensionale/deformativa - cuscinetti a sfera precaricati [13r006];
- Modello FEM da meditazione fornitoci dal subfornitore del subfornitore del subfornitore [13r009];

Lezione 4 - venerdì 17/2, 8÷12, 4h

Calcolo di strutture in regime nonlineare

- Fenomeni nonlineari nella meccanica delle strutture;
- Il metodo di Newton-Rapson;
- Gestione dei fenomeni di contatto tra corpi.

Modellazione FEM di giunzioni strutturali:

- collegamenti bullonati e rivettati
- giunti incollati
- punti e cordoni di saldatura

Caratterizzazione dinamica di strutture discretizzate ad elementi finiti:

- cenni teorici e limiti applicativi
- dati sperimentali richiesti, incertezze del metodo
 - quantificazione dello smorzamento
- procedura di calcolo e interpretazione dei risultati;

Materiale didattico di riferimento:

- (mini) dispensa di progettazione assistita trattante il metodo di Newton-Rhapson, con interpretazione grafica [14r001];
- Raju et al., *Some Observations On The Current Status of Performing Finite Element Analyses* [14r002];
- UK NPL Manual - Design and Testing of Bonded and Bolted Joints [14r003];
- Fregni, Caselli, Melotti - Tesi su verifica a fatica di cordoni di saldatura, con riferimenti normativi [14r004];
- materiale didattico su dinamica dei sistemi discretizzati FEM [14r006];
- contributi vari riguardanti la quantificazione dello smorzamento strutturale in strutture complesse [14r007];
- A Premount, *Twelve Lectures on Structural Dynamics*, 2013 [14r010];

Casi presentati e discussi:

- Una procedura di calcolo per gli adesivi da applicarsi con pensiero critico: G Dean and L Crocker, *The Use of Finite Element Methods for Design with Adhesives* [14r005];
- caratterizzazione dinamica di una struttura elementare [14r008];
- caratterizzazione dinamica di un [simil-]telaio di vettura Formula SAE [14r009];

Lezione 5 - venerdì 17/2, 14÷18, 4h

Caratterizzazione dinamica di strutture discretizzate ad elementi finiti:

- note per l'analisi dinamica di strutture complesse
- errori comuni e requisiti di qualità per la procedura
- procedure di comparazione tra risultati numerici e acquisizioni sperimentali

Instabilità in strutture discretizzate precaricate

- Modellazione di casi classici di instabilità euleriana
- Instabilità di singoli elementi in strutture complesse, es. pannelli, puntoni ecc.
- Esempio di calcolo post-instabilità in strutture complesse.

Strumenti avanzati di modellazione (cenni):

- Ottimizzazione strutturale.
- Condensazione statica e dinamica di strutture (sottostrutturazione).
- Criteri di rottura nei materiali compositi.

Materiale didattico di riferimento:

- R.J. Allemang, *The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse*, Journal of Sound and Vibration, August 2003 [15r001];
- T. Irvine, Effective modal mass & modal participation factors [15r002];
- Denise Lori-Eng Poy, *On the Buckling Finite Element Analysis of Beam Structures* [15r003];
- Carlos Felippa, da dispense corso Nonlinear Finite Elements Method, capitoli 28-33, 35, 37-38 [15r004];
- Contributi M. Cavazzuti relativi all'ottimizzazione strutturale di telai automobilistici [15r007];
- J.T. Joung, Primer on the Craig-Bampton method, 2000 [15r008];
- [US] Department of Defense, *Composite materials handbook*, 2002 [15r009];

Casi presentati e discussi:

- Perturbazioni geometriche e instabilità [15r005];
- Analisi ad instabilità di strutture complesse ad elementi ridondati: struttura trabeiforme pannellata [15r006];