



Calcolo strutturale con gli elementi finiti

Una spiegazione base del metodo degli elementi finiti applicato all'ingegneria strutturale.

Contiene CD con software SARGON[©]
versione LITE per strutture fino a 50 nodi

Paolo Rugarli

Una guida chiara, completa e comprensibile del calcolo strutturale degli elementi finiti. Un libro che copre un vuoto rilevante nel panorama informativo e viene incontro ai professionisti che non hanno potuto seguire corsi specifici su questo argomento o che non possono dedicarsi a testi specialistici, spesso in lingua inglese.

Il volume nasce proprio dalla volontà di spiegare in modo comprensibile le basi del metodo favorendo un uso più accorto della notevole potenza di calcolo oggi a disposizione. Esempi pratici tratti da casi reali di assistenza tecnica, consigli operativi, test comparativi: il libro è uno strumento operativo e indispensabile per approfondire e conoscere meglio il metodo. Importante anche il Cd allegato al volume, che contiene una versione limitata del software di calcolo agli elementi finiti Sargon[©] per Windows, sviluppato dall'Autore nel corso di un lavoro più che decennale presso la società Castalia s.r.l.. Completa la guida un dizionario dei termini più comuni.

Introduzione



Negli anni '80 si è assistito ad una progressiva diffusione del Metodo degli Elementi Finiti (o brevemente: Metodo), tra i professionisti, le società di engineering e le imprese di costruzioni. Si può dire che la diffusione dei programmi agli elementi finiti sia cominciata già negli anni '70 mediante il celeberrimo SAP (*Structural Analisys Program*¹), padre di tutti gli acronimi in questo settore. Tuttavia, la difficoltà d'uso e la scarsa disponibilità di mezzi di calcolo al di fuori delle strutture universitarie, fecero sì che la diffusione del Metodo fosse abbastanza limitata.

Va detto peraltro che anche la *domanda* di analisi agli elementi finiti era limitata: le norme non chiedevano calcoli di quel genere, e la committenza non esigeva - se non in casi molto particolari - relazioni di calcolo contenenti elaborati basati su calcoli agli elementi finiti. Era il tempo dei prontuari della più varia specie, di quelle opere, in auge sin dal XIX secolo, aventi l'obiettivo di campionare i casi più frequenti per offrire una rapida guida all'ingegnere non più freschissimo sul principio dei lavori virtuali, e giustamente privo della voglia di risolvere a mano un *sistemino* di cinque o dieci incognite. Fu il tempo glorioso della statica grafica.

Ovviamente tutto è cambiato con il diffondersi del *personal computing*.

La progressiva diffusione del Metodo (e del software) ha comportato una evoluzione delle normative, che oggi richiedono calcoli sempre più sofisticati e sempre meno affrontabili a mano; una maggior domanda di risultati generali e comprensibili in forma sintetica come mappe a colori, deformate, diagrammi di azioni interne ecc.; la rapida obsolescenza degli strumenti redatti in forma tabellare, e molte altre conseguenze ancora.

Apparentemente ciò dovrebbe aver portato ad un miglioramento della qualità delle opere ingegneristiche, e ad un accresciuto livello di sicurezza del-

I. Il programma SAP fu sviluppato all'università di Berkeley, in California, da Klaus Jürgen Bathe ed Edward Wilson. Del programma furono rilasciate diverse versioni, l'ultima delle quali è SAP V. Dopo SAP V gli Autori svilupparono un codice per calcoli nonlineari, NONSAP (1973), eppoi si divisero: il Professor Wilson sviluppò insieme con altri SAP80 eppoi SAP90; il Professor Bathe ADINA.

le stesse. Purtroppo per quanto riguarda la qualità, la situazione in Italia è sotto gli occhi di tutti¹. Per quanto riguarda l'accresciuto livello di sicurezza, invero, è tutto da dimostrare che si sia realmente ottenuto, e ciò per vari motivi.

Sebbene il Metodo sia oggi richiestissimo ed assai diffuso non sembra che altrettanto diffusa sia una conoscenza di base dei principi e delle regole che stanno dietro i sistemi di calcolo impiegati. Ciò sia perché per la diffusione non v'è stato tempo (molti professionisti non hanno potuto seguire corsi universitari sull'argomento), sia perché la gestione di un programma agli elementi finiti può rappresentare soltanto una parte del lavoro da svolgere: si pensi a quei numerosissimi professionisti che fanno i calcoli ma anche tante altre cose, e non hanno quindi il tempo per dedicarsi completamente all'apprendimento del Metodo e del programma di calcolo in loro possesso che ne consente l'impiego.

I testi specialistici sull'argomento sono spesso in lingua inglese², richiedono un considerevole impegno, e quindi difficilmente possono essere letti da chi ormai di tempo non ne ha più molto. A volte sono testi molto belli, ma purtroppo non sono conosciuti come dovrebbero, richiedendo, come richiedono, la passione e la costanza di chi può dedicare ad essi qualche mese di studio.

Se è comprensibile che i testi specialistici rappresentino un ostacolo non per tutti sormontabile, è anche vero che la completa assenza di studio è assai pericolosa: l'uso di programmi agli elementi finiti essendo privi di nozioni di base sul Metodo può obiettivamente dare luogo a serie sviste ed a inconvenienti che – anche se raramente vengono alla luce – rappresentano nondimeno un formidabile limite al progresso dell'ingegneria strutturale *reale*.

A tutt'oggi gli Allievi Ingegneri ed Architetti che seguono corsi specifici sull'argomento sono una ristretta minoranza.

Lo spunto per scrivere questo lavoro è venuto all'Autore nel corso di un lavoro *sul campo* durato undici anni. Il lavoro è stato quello di fornire spiegazioni ed as-

1. Tra le numerose possibili citazioni a riguardo, in "Fallimenti strutturali e defezioni previsionali", G. Sarà R. Nudo, contenuto in [15], viene detto ad esempio che "può apparire sorprendente l'elevata quantità di fallimenti strutturali di recente data riguardanti non solo le vecchie costruzioni degradate ma anche le costruzioni di nuova realizzazione". Tra le cause della situazione disastrosa, accanto alla rapacità di chi lucra a spese della sicurezza, l'ignoranza e l'abusivismo, viene anche detto "Si consideri, ancora, come il ricorso sempre più esteso agli strumenti informatici tenda ad indurre il progettista ad una ricezione passiva dei dati ottenuti mediante programmi di calcolo sempre più sofisticati, con conseguente progressiva riduzione del ricorso a strumenti tradizionali, ma fondamentali, di valutazione quali l'esperienza ed il giudizio critico".

2. I testi [2], [3], [4] sono vere e proprie "testi sacri" citati sempre universalmente e fondamentali per chi voglia approfondire con testi inglesi, scritti da alcuni degli Autori che hanno "fatto" il Metodo. In lingua italiana l'Autore conosce i testi [5], [6], [25] (parte di una serie sul Metodo), [26] tutti comunque di tipo più o meno specialistico.



sistenza tecnica agli utilizzatori del programma agli elementi finiti *Sargon* che — nel corso degli anni — l'Autore stava scrivendo (e che compare sul CD allegato in una versione ridotta). Proprio facendo questo lavoro è emerso che tante volte le spiegazioni riguardavano non già gli aspetti operativi, bensì quelli più strettamente legati alla teoria (ampia la casistica sulle labilità, sull'uso di elementi finiti appropriati per un dato problema, sull'analisi modale, ecc. ecc.).

Il lavoro è diviso nel seguente modo.

- Il capitolo 2 è una panoramica sul *Metodo*, e serve a farsi una prima idea della materia che verrà trattata. L'idea è quella di fornire sin da subito un quadro di riferimento nel quale inserire gli argomenti che verranno trattati nel corso del libro. Sebbene si sia cercato di chiarire al massimo, diversi concetti che saranno in seguito illustrati sono qui appena abbozzati e sgrossati: il lettore sappia che essi verranno ulteriormente approfonditi nel seguito.
- Il capitolo 3 è un riepilogo dei principali risultati delle varie teorie semplificate, che devono essere conosciute almeno per sommi capi da chi vuol fare modellazione. Chi già conosce le varie teorie può scorrerlo giusto per vedere la notazione usata. Chi non ha nozione alcuna di teoria della elasticità troverà presumibilmente difficoltà che lo indurranno ad approfondire. I più potranno trovare in questo capitolo un piccolo riepilogo dei fatti salienti e rinfrescare la memoria. Non è indispensabile conoscere a memoria le equazioni differenziali, ma le ipotesi base, sì.
- Il capitolo 4 entra nel dettaglio di ciò che il *Metodo* prevede per un *elemento finito generico*, introducendo tutti i concetti più importanti. Lo sforzo è stato quello di descrivere in termini generali il problema, riferendosi all'approccio negli spostamenti che è quello affermatosi storicamente per primo e che rappresenta la via maestra per comprendere il *Metodo*. Questo capitolo è fondamentale, nel lavoro, per comprendere il *Metodo*.
- Il capitolo 5 descrive l'assemblaggio, che riunisce le informazioni sui vari elementi finiti.
- Il capitolo 6 tratta delle azioni, il 7 dei vincoli, cercando di descrivere tutti i principali inconvenienti che possono sorgere.
- Il capitolo 8 spiega i tipici problemi legati alla soluzione numerica del problema algebrico finale (*solving*) nonché alla restituzione degli sforzi sugli elementi (*stress recovery*). E' in questo capitolo che vengono svelati i trucchi che consentono di avere belle (e infedeli) mappe a colori.
- Il capitolo 9 si sofferma sulle tecniche impiegabili per valutare l'errore,

tecniche da usare per sottoporre ogni analisi a controlli di bontà ed affidabilità. L'insieme dei capitoli 4, 5, 6, 7, 8 e 9 costituisce una spiegazione di base del Metodo.

- Il capitolo 10 illustra sinteticamente le problematiche tipiche delle varie formulazioni viste nel capitolo 3, dal punto di vista degli elementi finiti, cerca in somma di legare le formulazioni ai problemi concreti.
- Il capitolo 11 descrive le caratteristiche degli elementi finiti più usati nelle varie formulazioni, senza la pretesa di descrivere dettagliatamente tutti gli elementi (ma travi, bielle e stati piani, sì) però cercando di dare informazioni sulla loro efficienza.
- Il capitolo 12 si sofferma sui problemi di modellazione più tipici, cercando di dare delle tracce capaci di individuarli e rimuoverli. Sono elencati numerosi esempi anche di modelli errati e schemi e tabelle utili per fare nuovi modelli. Lo studio degli errori fatti da altri e dei problemi di raffinatezza della discretizzazione può aiutare a capire come muoversi, tenendo conto che si è immaginato di usare software di fascia media, quali quelli maggiormente diffusi tra i Professionisti.
- Il capitolo 13 fa cenno dei tipici problemi legati alla implementazione di verificatori automatici, al fine di informare almeno per sommi capi del fatto che non si tratta di programmi miracolosi, ma di programmi irti – a loro volta – di problemi e difficoltà. I capitoli 10, 11, 12 e 13 formano una specie di guida pratica al Metodo.
- L'appendice I è dedicata alla notazione ed a alcuni richiami di calcolo
- L'appendice II è dedicata ai minimi richiami di teoria della elasticità.
- L'appendice III elenca i principali simboli usati nel testo.
- L'appendice IV è un dizionario minimo, utile per consultazioni rapide.
- L'appendice V dà spiegazioni sul CD allegato.

Per quanto riguarda l'uso di termini inglesi nel testo, questi sono stati tutti spiegati e comunque si trovano anche nel dizionario. A parere di chi scrive non è questo l'ambito nel quale le Accademie della Crusca (peraltro benemerite in altre sedi) devono interferire. Non v'è nulla di male nell'usare termini stranieri se tutta la comunità scientifica internazionale li usa e se quei termini sono stati proposti da chi ha inventato, di volta in volta, le tecniche di cui si parla. Nel sei e settecento i termini musicali erano italiani e oggi troviamo partiture tedesche ove è scritto "piano" o "andante", e nessuno si stupisce (addirittura abbiamo "Condoleezza" Rice). Non si vede perché noi dovremmo dire "gdl trapanatura" anziché *drilling dof*: sarebbe prima di tutto ridicolo.