



IL PROGETTO STRUTTURALE: QUALIFICAZIONE E CONTROLLO

Sergio Tattoni

Università degli studi di Cagliari
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Piazza d'Armi 09123 Cagliari, Italy
e-mail stattoni@unica.it

Sommario: *Le nuove norme tecniche per le costruzioni dedicano l'intero capitolo 10 alla redazione del progetto esecutivo. Seguendone le indicazioni e commentandole, si ravvisa nel controllo del progetto da parte di terzi, nella ricerca della chiarezza e della organicità e nella valutazione dell'accettabilità dei risultati delle analisi delle elaborazioni la via per pervenire alla qualità richiesta alla documentazione progettuale.*

1. Introduzione

Ha ormai compiuto un anno il nuovo Decreto Ministeriale “Norme tecniche per le Costruzioni” del 14 settembre 2005, conosciuto anche come “Testo Unico”; tra le molte novità introdotte appare anche il capitolo 10 “Norme per la redazione dei progetti esecutivi”.

È evidente la volontà del legislatore di enfatizzare l'importanza dei documenti di progetto nel perseguimento della qualità dell'intero processo edilizio, congiuntamente ai materiali ed alle modalità esecutive.

Ci si può domandare se questo capitolo fosse necessario, dato che il progetto si forma in un ambiente (lo studio tecnico) caratterizzato da persone di alto livello culturale (laureati e diplomati), teoricamente in grado di fornire un prodotto informato a “... *carattere di uniformità, chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti.*” La risposta ovviamente è affermativa e, come si evince proseguendo la lettura del punto 10.1, tale necessità discende soprattutto dal sempre più diffuso impiego delle analisi svolte con l'ausilio dell'elaboratore elettronico e dall'impiego massiccio di software dedicati all'analisi strutturale.

Prima dell'avvento e della diffusione di tali mezzi, indicativamente a partire dagli anni '80 del secolo scorso, le relazioni di calcolo ed elaborati di progetto erano il sudato frutto di ragionamenti volti ad interpretare in maniera più o meno semplificata il comportamento delle strutture progettate e le verifiche erano sempre guidate dalla sensibilità ed esperienza dell'ingegnere calcolatore che si confrontava sistematicamente con soluzioni consolidate provenienti anche dalla manualistica (il famoso Kleinlogel!).

I progettisti più attenti si erano però resi conto dei rischi del calcolo automatico che comunque produce un risultato, anche se non necessariamente pertinente ed appropriato. Ricordo il famoso acronimo inglese GIGO (Garbage In, Garbage Out) che con mirabile sintesi riassume i problemi del calcolo automatico.

2. Richiami storici

Ciò che per noi oggi appare scontato, ossia la dimostrazione matematica della sicurezza delle costruzioni, è in realtà frutto di un lungo processo culturale. Il testo unico nel Preambolo (cap.1) ricorda i passi principali di questo percorso che possono così riassumersi.

Regio Decreto del 10 gennaio 1907.

La norma poneva fine all'epoca ottocentesca durante la quale la sicurezza delle costruzioni si ipotizzava formalmente garantita dal rispetto delle regole tecniche senza l'obbligo della verifica numerica.

La nuova norma sostanzialmente sostituiva ad un processo prescrittivo estrinsecantisi nel rispetto di regole tecniche, l'obiettivo prestazionale era individuato dai livelli tensionali che dovevano essere rispettati dai componenti strutturali, applicando un coefficiente di sicurezza sulla resistenza dei materiali $\gamma_m = 5$.

Le caratteristiche dei materiali dovevano essere individuate attraverso prove sperimentali ed il progetto doveva essere accompagnato da una relazione di calcolo.

Regio Decreto del 16 novembre 1939.

Norme per l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice ed armato.
Caratteristiche della norma: chiarezza, univocità, certezza.

La norma imponeva ed attuava in maniera rigorosa le aspettative della precedente norma del 1907, indicando in modo puntuale prestazioni e processi di verifica della sicurezza, stabiliva l'elenco dei Laboratori Ufficiali ed introduceva il processo di controllo ed approvazione dei calcoli statici e del progetto da parte del Genio Civile e delle Prefetture.

Legge 1086 del 5 novembre 1971

Questa norma, che si estrinseca nel decreto ministeriale del 30 maggio 1972 è, nella prima stesura, essenziale e prestazionale come quelle che l'avevano preceduta e contiene aspetti fortemente innovativi: la sicurezza delle opere diventa un fatto probabilistico, le caratteristiche meccaniche devono derivare da insiemi statistici di misure fisiche. Per verificare la sicurezza viene introdotta, oltre ai metodi elastici, la possibilità di utilizzare il calcolo a rottura.

CNR 10024/84, Analisi delle strutture mediante elaboratore elettronico: impostazione e redazione della relazione di calcolo.

Più che normativa, si tratta di istruzioni che, essendo non cogenti, furono letteralmente ignorate dalla stragrande maggioranza dei progettisti. Eppure tali istruzioni sintetizzano mirabilmente il processo logico che porta alla verifica della sicurezza passando attraverso l'analisi strutturale. Come suggerisce lo stesso testo, le raccomandazioni si possono applicare anche al calcolo manuale.

Il nuovo testo unico riprende alcuni punti salienti di queste istruzioni, alle quali è comunque possibile fare riferimento per maggiori chiarimenti e delucidazioni.

Gli Eurocodici

Iniziano ad essere pubblicati dall'UNI come documento provvisorio alla fine degli anni '90 del secolo scorso; su tali documenti si è molto parlato e sono stati organizzati numerosi convegni e giornate di studio ed approfondimento.

Essi costituiscono parte consistente sia quella "letteratura tecnica consolidata" cui fa riferimento il Testo Unico.

3. La normativa attuale e la qualità del progetto

3.1 Il controllo di terzi

La qualificazione di un prodotto, sia esso un componente, un materiale, un edificio o un progetto come nel nostro caso, presuppone l'effettuazione di un controllo.

Tale concetto è ben presente nel nuovo Testo Unico ed è espresso nei seguenti paragrafi, che si riportano per intero per chiarezza espositiva.

Dal punto 10.4. *“Il complesso dei dati riguardanti il modello di calcolo deve essere tale da consentire a soggetti diversi dall'estensore della relazione di calcolo di sviluppare elaborazioni indipendenti”*.

Dal punto 10.7. *“Modalità di presentazione dei risultati.*

La quantità di informazioni che usualmente accompagna l'utilizzo di procedure di calcolo automatico richiede un'attenzione particolare alle modalità di presentazione dei risultati, in modo che questi riassumano, in una sintesi completa ed efficace, il comportamento della struttura per quel particolare tipo di analisi sviluppata. L'esito di ogni elaborazione deve essere sintetizzato in disegni e schemi grafici contenenti le configurazioni deformate, la rappresentazione grafica delle principali caratteristiche di sollecitazione o delle componenti degli sforzi, i diagrammi di involuppo associati alle combinazioni dei carichi considerate, gli schemi grafici con la rappresentazione dei carichi applicati e delle corrispondenti reazioni vincolari. Di tali grandezze, unitamente ai diagrammi ed agli schemi grafici, vanno chiaramente evidenziati i valori numerici nei punti o nelle sezioni significative ai fini della valutazione del comportamento complessivo della struttura e quelli necessari ai fini delle verifiche di misura della sicurezza.”

Il Controllo Tecnico è una pratica in via di diffusione in Italia e consiste nel controllo del processo di costruzione dalla progettazione alla realizzazione di un'opera. In Francia, dove per legge è obbligatoria l'assicurazione delle costruzioni, il controllo è una pratica ormai consolidata essendo richiesta dalle stesse compagnie assicuratrici; l'esito del controllo influisce sulla determinazione del premio di assicurazione o, addirittura, sull'accensione o meno della polizza.

Anche nel nostro paese si va instaurando tale procedura, soprattutto ai fini della stipulazione di polizze assicurative tipo CAR (Contractor All Risk) o del tipo Decennale Postuma. A volte viene richiesta per la realizzazione di grandi iniziative immobiliari (p.e. centri commerciali), ma non sempre viene definita chiaramente nel contratto tra Committente ed Impresa, confondendo il controllo tecnico col “pilotage”.

Il Controllo Tecnico viene effettuato da un ente terzo (p.e. ICMQ, Bureau Veritas, Socotec, Conteco, ...) ed è finalizzato ad accertare la conformità alle prescrizioni normative e/o alle specifiche contrattuali. Il Controllore non ha poteri per interferire col processo costruttivo, e le responsabilità civili e penali rimangono alle figure istituzionali del processo edilizio (Impresa, Progettista, Direttore dei Lavori, Collaudatore).

Nel caso del progetto, il Controllore verifica:

- la completezza dei documenti progettuali (come indicato nel punto 10.1 del Testo Unico o dalla cosiddetta “legge Merloni”);
- l'eshaustività dei contenuti dei documenti stessi (o quindi anche nel merito);
- l'impostazione progettuale e, nel caso del progetto delle strutture, la significatività dei modelli di calcolo anche in relazione all'importanza della struttura stessa;
- la conformità delle ipotesi progettuali ai dettati legislativi ed alle richieste prestazionali particolari espresse dal Committente (il Testo Unico responsabilizza in questo anche il Committente, come si legge al punto 2.1: “*I livelli di sicurezza devono essere scelti dal Committente e dal Progettista, di concerto, in funzione dell'uso e del tipo di struttura, della situazione di progetto, nonché ...*”
- la rispondenza delle verifiche di sicurezza ai dettati legislativi ed alle metodologie riconosciute della Teoria e della Tecnica delle Costruzioni.

Per espletare quest'ultima attività (o “missione”) il Controllore può ripercorrere l'iter del calcolo strutturale in modo indipendente: da qui la necessità della massima

trasparenza e leggibilità dei documenti progettuali (disegni, relazione e, soprattutto, la relazione di calcolo).

La novità della procedura di Controllo nel panorama dell'ingegneria italiana, viene a volte mal intesa dal Progettista come se fosse inquisitoria o addirittura vessatoria, causando spesso diffidenza ed incomprensione. In realtà il Controllore si affianca, e non si contrappone al Progettista, aiutandolo ad individuare tempestivamente errori o non conformità (purtroppo sempre in agguato nella nostra professione e dai quali nessuno di noi è immune!).

A titolo di aneddoto esplicativo riporterò una mia personale esperienza. Nel capitolato prestazionale del Committente, tradotto dal tedesco, il termine "Nutzlast = 1000 kg/m²" venne tradotto come "sovraccarico = 1000 kg/m²" anziché "carico utile = 1000 kg/m²", inducendo così il prefabbricatore a fornire una struttura dimensionata per un "sovraccarico = permanenti + accidentali = 300+700 kg/m²". L'equivoco venne alla luce solo nel momento in cui, nella mia qualità di Collaudatore Statico, sottomisi il programma di prove di carico per i soli accidentali, essendo i permanenti (sottofondo, pavimento ed impianti) già in opera. A causa dei 300 kg/m² mancanti la struttura dovette essere ricalcolata e rinforzata.

Il Controllo, effettuato da tecnici competenti ed esperti, può aiutare il Progettista a ricostituire quella uniformità, chiarezza espositiva e completezza nei contenuti, che a volte si perde nella redazione di un progetto sotto la pressione dei tempi di consegna e l'incalzare delle richieste di variazione e di modifica spesso avanzate dallo stesso Committente.

3.2 Accettabilità dei risultati

Anche questo punto è giustamente enfatizzato dal nuovo Testo Unico, riprendendo quanto già suggeriva la CNR 10024/84. Troppo spesso lo stupore della enorme potenza e velocità di calcolo portano gli analisti meno esperti ad accettare supinamente i risultati della elaborazione (quante volte abbiamo sentito la frase: "l'ha detto il Computer!"). Altre volte, spesso in occasione di contenziosi o perizie giudiziarie, l'esibizione di mappe colorate e tabulati come se fossero l'esatta riproduzione del comportamento fisico della struttura rende volutamente difficoltoso il controllo delle assunzioni del Progettista imponendo l'illimitata fiducia nella correttezza e nella pertinenza del modello e nella sostanziale correttezza delle elaborazioni.

Anche per questo aspetto si riportano per chiarezza i punti più significativi del Testo Unico.

Dal Punto 10.7. "Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.

Il progettista deve effettuare una valutazione complessiva circa l'affidabilità dei risultati ottenuti dall'analisi automatica. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con metodi tradizionali e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc.”

Il risultato dell'elaborazione è accettabile in quanto si conforma a quello atteso: si conferma quindi il primato del Progettista, della sua esperienza, competenza e sensibilità.

Non a caso riporto provocatoriamente l'immagine di uno strumento, ormai obsoleto, che ha scritto la storia dell'Ingegneria e che alcuni nostalgici forse rimpiangono (vedi Figura 1).



Figura 1. Regolo calcolatore.

Chi ha usato il regolo si sentiva vicino ai numeri, era consapevole degli errori di arrotondamento e delle imprecisioni sistematiche. L'uso del regolo richiedeva una comprensione più profonda del lavoro.

Ottenere a mano le risposte numeriche significava raggiungere la soluzione dei problemi attraverso l'analisi e la conoscenza, piuttosto che un puro macinare di numeri.

La limitata velocità di calcolo induceva i matematici a semplificare i problemi complessi, nascondendo spesso i termini di ordine superiore sotto il tappeto dei calcoli.

Si cercavano scorciatoie, che nel migliore dei casi facevano risparmiare tempo e stimolavano l'intuizione e nel peggiore potevano nascondere sbagli e provocare grossolani errori.

Consci di basarsi su calcoli imperfetti, gli ingegneri progettavano in modo prudente (maggiori spessori, maggiore robustezza): questo migliorò affidabilità e durata, ma costò in materiali, scarse prestazioni e talvolta malfunzionamenti.

Quindi non è possibile, nell'ingegneria moderna, prescindere dall'impiego dei nuovi potenti mezzi di calcolo, a patto di controllarne i risultati analizzando criticamente le difformità che il calcolo automatico può produrre rispetto a quello manuale.

I controlli di cui parla la normativa sono relativamente semplici.

Innanzitutto si dovrà esaminare la deformata ed in particolare la sua congruenza con i vincoli ed i carichi, nonché l'entità degli spostamenti. A parte casi palesi di labilità, in

genere segnalati dai software più comunemente diffusi, è possibile ottenere soluzioni di sistemi non perfettamente vincolati a prezzo di spostamenti elevatissimi.

Un secondo controllo riguarda poi l'esame qualitativo delle azioni interne, agevolato dai post processor attualmente disponibili, che devono avere entità e segno congruente con i carichi applicati. Deve destare sospetto un pilastro teso o una trave caricata da azioni gravitazionali e che mostri le fibre inferiori compresse anziché tese.

L'entità dell'azione flettente deve essere messa a confronto con quella di una trave semplice (vedi Figura 2) dato che comunque la freccia del diagramma deve essere rispettosa delle equazioni canoniche dell'equilibrio.

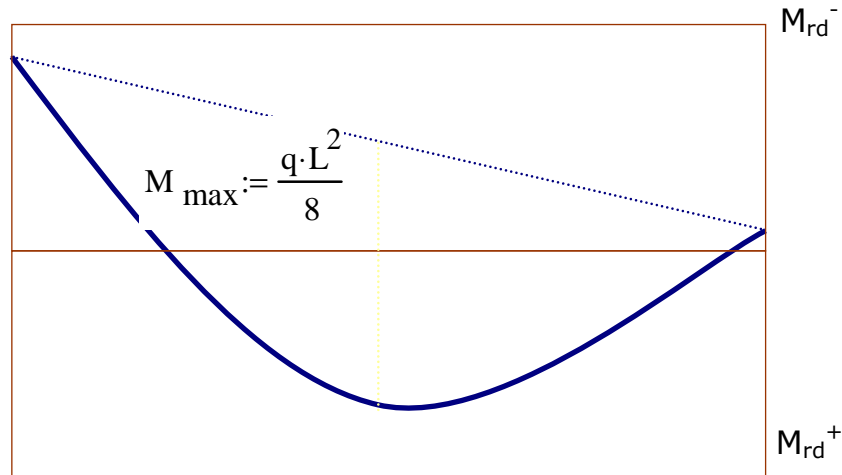


Figura 2. Condizione di conformità per una trave inflessa.

Le equazioni canoniche dell'equilibrio devono essere rispettate anche per strutture complesse, come le travature reticolari, ancorché parzialmente iperstatiche (continuità di alcune aste). Semplici poligoni delle forze disegnati per i singoli nodi o raggruppati nel diagramma Cremoniano (vedi Figura 3) consentono di quantificare l'entità delle azioni fondamentali in gioco (azioni assiali). A chi non potesse proprio fare a meno del proprio PC, ricordo che grazie ad Autocad è assai agevole disegnare un diagramma Cremoniano senza preoccuparsi della direzione in cui si evolverà e che si chiude esattamente!

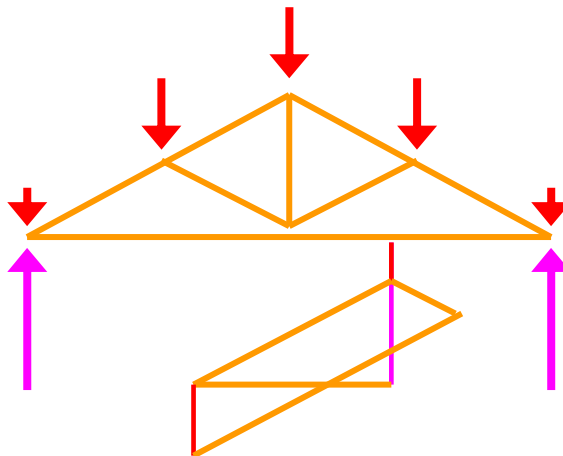


Figura 3. Diagramma cremoniano di una cappelletta realizzato con Autocad.

Infine, ma non meno importante, è il controllo dell'equilibrio globale. La somma delle componenti verticali delle reazioni vincolari deve eguagliare il peso dell'edificio e dei sovraccarichi applicati, quella delle componenti orizzontali deve essere nulla o eguagliare la risultante delle pressioni del vento o delle spinte delle terre, ecc.

Se poi il programma di calcolo è anche dotato di una sezione di progetto o di verifica, non vergogniamoci di controllarne i risultati ricorrendo al concetto semplificato di “coppia interna” (Figura 4) o a quello di “putrella ideale” (Figura 5).

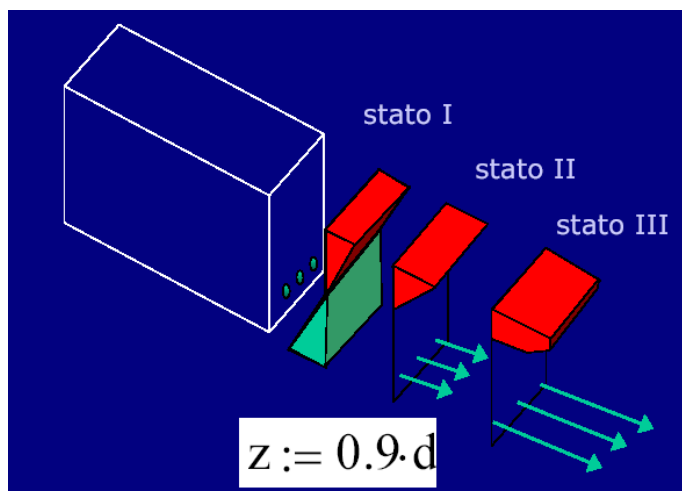


Figura 4. La coppia interna in una trave in c.a.o.

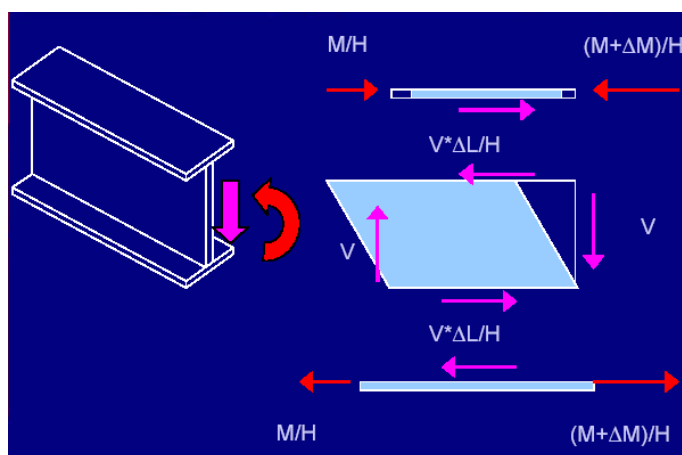


Figura 5. L'ipotesi di putrella ideale.

4. Conclusioni

La qualità del progetto, condizione necessaria per l'ottenimento delle caratteristiche prestazionali delle strutture, può essere perseguita utilizzando le linee guida indicate dalle attuali normative (Testo Unico e CNR 10024/84).

Significativa ed auspicabile è l'attività di Controllo del progetto, esercitata da un ente terzo già dalle prime fasi delle operazioni progettuali, ossia praticamente durante il conceptual design.

Punto chiave per la redazione di un progetto esecutivo riguardante le strutture che sia informato a caratteri di uniformità, chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti è la sua leggibilità e la ripetibilità dei calcoli da parte di terzi. A questo riguardo è auspicabile che le software houses dotino i loro programmi di opportuni specifici dati di trasferimento dei dati al fine di consentire l'agevole passaggio delle informazioni da un programma ad un altro indipendente.

Un'altra via, oltremodo innovativa (P. Rugarli), sarebbe quella di diffondere programmi in versione "reader" in modo da consentire una lettura ed analisi del modello (per via di interrogazioni) all'interno dello stesso programma usato dal progettista, pur senza doverne acquistare una licenza completa.

Infine non deve essere trascurata la verifica dei risultati ottenuti mediante la tecnica del "cross check" e mediante l'uso di modelli semplificati. Comunque il progettista o l'analista dovrà sempre utilizzare il proprio spirito critico, sostenuto da un adeguato ed aggiornato bagaglio culturale che proviene dallo studio della Teoria e della Tecnica delle Costruzioni.

5. Bibliografia

[1] Emkin L. Z. - *Misuse of Computers by Structural Engineers: a clear and present Danger* - Proc. of the 1st Struct. World Congress, San Francisco 19-23 July 1998.

[2] Rugarli P. - *Software di calcolo* - Manuale dell'Ingegnere S4, 84a edizione, Hoepli 2003.

[3] Rugarli P. - *Norme per la redazione dei progetti esecutivi* - Norme Tecniche per le Costruzioni, Analisi e commento del D.M. 14/09/05, ed. Il Sole 24ore, 2006

[4] Stoll C. - Quando il regolo dettava le regole - *Le Scienze* n°455, luglio 2006.