

AURELIO GHERSI PIETRO LENZA

EDIFICI ANTISISMICI IN CEMENTO ARMATO

**Progettati secondo le indicazioni
delle nuove normative**



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o al programma allegato
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF8791

Indice

Premessa.....	11
Capitolo 1	
PROFILO STORICO DELL'ANALISI STRUTTURALE E DELLA NORMATIVA TECNICA IN ZONA SISMICA.....	15
1. Una recente "rivoluzione".....	15
2. Evoluzione storica del concetto di sicurezza.....	16
3. Evoluzione storica della strategia di difesa dai terremoti.....	19
4. Il recente quadro normativo nazionale.....	22
Capitolo 2	
ELEMENTI BASE DI INGEGNERIA SISMICA.....	25
1. Premessa.....	25
2. Natura dei terremoti.....	26
3. Il sistema ad un grado di libertà.....	31
4. Comportamento elastico del sistema ad un grado di libertà.....	33
4.1. Oscillazioni libere in assenza di smorzamento.....	33
4.2. Oscillazioni libere in presenza di smorzamento.....	35
4.3. Oscillazioni forzate.....	36
4.4. Risposta sismica e spettro di risposta elastico.....	40
4.5. Spettri di risposta elastica di normativa.....	47
5. Comportamento di un sistema elasto-plastico ad un grado di libertà.....	47
5.1. Duttilità.....	47
5.2. Risposta sismica di sistemi elasto-plastici.....	49
5.3. Spettri di progetto di normativa.....	51
6. Sistemi continui e sistemi a più gradi di libertà.....	52
7. Comportamento elastico dei sistemi a più gradi di libertà.....	53
7.1. Oscillazioni libere e modi principali di oscillazione.....	53
7.2. Risposta sismica.....	58
7.3. Analisi modale con spettro di risposta.....	59
7.4. Analisi statica.....	61

8. Comportamento inelastico dei sistemi a più gradi di libertà	63
9. Comportamento di sistemi tridimensionali.....	65
10. Analisi statica non lineare	69
11. Considerazioni conclusive	73
Bibliografia essenziale	74
Capitolo 3	
PRESCRIZIONI DELLA NORMATIVA SISMICA.....	75
1. Principi e regole applicative.....	75
2. Obiettivi della progettazione antisismica.....	77
3. L'azione sismica	79
3.1. Zone sismiche	79
3.2. Categorie di terreno e condizioni topografiche.....	80
3.3. Spettri di risposta elastici della normativa.....	82
3.4. Spettri di progetto della normativa	90
3.5. Fattore di struttura.....	91
4. Combinazione dell'azione sismica con le altre azioni	95
5. Analisi strutturale.....	98
5.1. Tipi di analisi.....	98
5.2. Analisi statica.....	98
5.3. Analisi modale e statica: un esempio numerico	99
5.4. Analisi statica non lineare	102
5.5. Analisi dinamica non lineare.....	103
6. Regolarità strutturale	104
6.1. Regolarità in pianta	104
6.2. Regolarità in altezza	106
Capitolo 4	
CONCESSIONE STRUTTURALE DELL'EDIFICIO	109
1. Evoluzione storica dell'edificio ad uso abitativo.....	109
2. Gli elementi che costituiscono l'edificio	112
2.1. L'impalcato e i solai.....	112
2.2. Le travi e i pilastri.....	115
2.3. La struttura della scala.....	118
2.4. Il sistema fondale	120
3. Principi fondamentali della progettazione strutturale.....	121
Capitolo 5	
DIMENSIONAMENTO DELLA STRUTTURA.....	127
1. Collocazione del progetto strutturale nel processo edilizio.....	127
2. Impostazione della carpenteria.....	128
2.1. Problematiche generali	128
2.2. Criteri per l'impostazione della carpenteria	129
3. Primo dimensionamento delle sezioni	133
4. Prima verifica delle scelte progettuali.....	140
5. Una ulteriore possibile verifica più approfondita	147

Capitolo 6	
RISOLUZIONE DELLO SCHEMA STRUTTURALE	149
1. Analisi da svolgere	149
1.1. In assenza di sisma	150
1.2. In presenza di sisma con alto periodo di ritorno	150
1.3. In presenza di sisma con basso periodo di ritorno	153
2. Carichi verticali e masse	154
2.1. Carichi unitari	154
2.2. Carichi sulle travi	157
2.3. Massa dell'impalcato	159
2.4. Baricentro delle masse	161
2.5. Eccentricità accidentale	162
3. Organizzazione delle condizioni di carico	162
4. Definizione dello schema geometrico	163
4.1. Evoluzione dei modelli di calcolo	164
4.2. Problematiche di modellazione più recenti	167
4.3. Elementi principali e secondari	172
4.4. Modellazione delle tamponature	172
5. Analisi dei risultati degli schemi base	175
5.1. Carichi verticali	176
5.2. Forze orizzontali – analisi statica	176
5.3. Analisi modale	178
5.4. Effetto dell'eccentricità accidentale	179
5.5. Considerazioni sull'effetto della contemporanea presenza delle due componenti del sisma	180
6. Combinazione degli schemi base	181
7. Analisi critica e revisione dell'impostazione strutturale	183
Appendice: risoluzione del telaio spaziale	186
Capitolo 7	
PROGETTO DELLE ARMATURE	195
1. Considerazioni generali	195
2. Gerarchia delle resistenze	195
3. Travi: armature a flessione	197
3.1. Caratteristiche di sollecitazione	197
3.2. Calcolo dell'area di armatura necessaria	199
3.3. Disposizione delle barre longitudinali	199
4. Travi: armature a taglio	201
4.1. Caratteristiche di sollecitazione	201
4.2. Verifica a taglio e calcolo dell'area di staffe necessaria	203
4.3. Consigli pratici per l'armatura a taglio	205
5. Travi: duttilità	206
6. Pilastri: armature a flessione composta	207
6.1. Caratteristiche di sollecitazione	207
6.2. Progetto dell'armatura	210

7. Pilastri: armatura a taglio	211
8. Nodi trave-pilastro	212
Appendice: procedura approssimata per la pressoflessione retta	217
Capitolo 8	
VERIFICA DEGLI IMPALCATI	219
1. Prescrizioni della normativa	219
2. Modellazione dell'impalcato	220
2.1. L'impalcato nel modello globale della struttura	220
2.2. Modellazione per la verifica dell'impalcato	222
3. Schemi per l'analisi dell'impalcato	223
3.1. Ossatura intelaiata priva di tamponature	223
3.2. Ossatura intelaiata con tamponature	225
3.3. Schemi limite di comportamento in presenza di tamponature	227
4. Verifica di rigidezza	229
5. Verifica di resistenza e armatura dell'impalcato.	231
Capitolo 9	
IL SISTEMA FONDALE E LA SUA INTERAZIONE CON LA STRUTTURA IN ELEVAZIONE.....	235
1. Introduzione.....	235
2. Scelta del sistema fondale.....	238
3. Dimensionamento delle fondazioni.....	240
3.1. Travi rovesce e reticolo di travi	241
3.2. Plinti diretti	242
3.3. Plinti su pali	242
4. Modellazione	243
4.1. Travi rovesce e reticolo di travi	244
4.2. Plinti diretti	245
4.3. Plinti su pali	246
4.4. Considerazioni sulla modellazione	247
5. Una verifica globale "a vista" della struttura	248
Capitolo 10	
ESEMPIO: DIMENSIONAMENTO DELLA STRUTTURA	251
1. Introduzione.....	251
2. Caratteristiche dell'edificio	251
3. Impostazione della carpenteria.....	257
4. Dimensionamento delle sezioni	260
5. Verifica di massima delle scelte progettuali	263
5.1. Valutazione dell'azione sismica	263
5.2. Caratteristiche della sollecitazione e verifica	265
5.3. Spostamenti per stato limite di danno	267
5.4. Sollecitazioni e dimensioni per bassa duttilità	268
6. Considerazioni finali sul dimensionamento della struttura.....	269
7. Disegno esecutivo della carpenteria	270

Capitolo 11

ESEMPIO: RISOLUZIONE DELLO SCHEMA.....	275
1. Carichi.....	275
1.1. Carichi unitari.....	275
1.2. Carichi sulle travi.....	276
1.3. Massa dell'impalcato.....	279
1.4. Eccentricità accidentali.....	281
2. Condizioni di carico.....	281
3. Schema geometrico.....	285
4. Analisi dei risultati degli schemi base.....	286
4.1. Carichi verticali.....	286
4.2. Analisi modale.....	286
4.3. Effetto dell'eccentricità accidentale.....	290
4.4. Considerazioni sull'effetto della contemporanea presenza delle due componenti del sisma.....	291
5. In alternativa: analisi statica.....	292
6. Una possibilità: nuovo dimensionamento della struttura.....	294
7. Combinazione degli schemi base.....	298
8. Considerazioni sulla modellazione.....	301

Capitolo 12

ESEMPIO: PROGETTO DELLE ARMATURE.....	303
1. Travi: armatura a flessione.....	303
2. Travi: armatura a taglio.....	305
3. Pilastrri: armatura a pressoflessione.....	309
4. Pilastrri: armatura a taglio.....	316
5. Nodi trave-pilastrro.....	317
6. Dettagli costruttivi.....	318
Appendice – Relazione secondo le indicazioni del capitolo 10 delle NTC 08.....	320

Capitolo 13

ALTRI PROGETTI.....	323
1. Progetto di un primo edificio intelaiato in c.a.....	323
1.1. Introduzione.....	323
1.2. Dati generali.....	323
1.3. Impostazione della carpenteria e primo dimensionamento delle sezioni dei pilastri.....	324
1.4. Prima verifica ed armatura dei pilastri e dimensionamento delle travi.....	325
1.5. Analisi della struttura con un modello traslante.....	325
1.6. Verifica finale della struttura in elevazione.....	327
1.7. Il sistema fondale.....	330
1.8. Considerazioni finali.....	330
2. Progetto di un secondo edificio intelaiato in c.a.....	332
2.1. Introduzione e dati generali.....	332
2.2. La rappresentazione grafica del progetto strutturale esecutivo.....	332
2.3. Le principali tavole strutturali.....	334

Premessa

La pubblicazione di un nuovo libro rappresenta il punto finale di un processo di studio, riflessione e discussione ma deve comunque sempre considerarsi solo una tappa del processo della conoscenza.

Questo libro si collega fortemente al precedente testo di uno di noi, Aurelio Ghersi, intitolato “Edifici antisismici con struttura intelaiata in cemento armato”. La sua prima versione ufficiosa, dattiloscritta, distribuita agli studenti risale al 1985. La prima edizione ufficiale ad opera della CUEN (Cooperativa Universitaria Editrice Napoletana), uscita nell’aprile 1986, è stata poi sostituita dalla versione finale, ampliata, del 1988.

Il vecchio testo nasceva dal desiderio di trasmettere ad altri le conoscenze maturate nelle esperienze concrete di quegli anni. Esperienze che partono immediatamente dopo la laurea, nel 1975, con il dimensionamento, il calcolo e lo schizzo delle armature di piccole costruzioni mono o bi-familiari per conto di un collega di Ischia, Luigi Monti. Un grande arricchimento culturale derivava dalla collaborazione allo studio del prof. Michele Pagano, che offriva l’occasione di esaminare strutture ben più complesse, anche se raramente ubicate in zona sismica. Fondamentale, infine, l’esperienza del terremoto del 1980. La collaborazione alle perizie sui crolli avvenuti a Sant’Angelo dei Lombardi e a Lioni aveva permesso di esaminare i progetti e constatare gli effetti del sisma su tante strutture. E, nello stesso tempo, era stato necessario assumere responsabilità in prima persona, nel valutare l’agibilità di edifici danneggiati, in particolare ad Auletta. Queste esperienze professionali non erano mai disgiunte dall’attività didattica condivisa con i colleghi Mario De Matteo, Pietro Lenza e Bruno Calderoni, nell’ambito dei corsi di Complementi di tecnica delle costruzioni, tenuti a Napoli dai professori Michele Pagano e Aurelio Giliberti.

I primi anni ’80 erano tempi completamente diversi da quelli odierni. Per le elaborazioni numeriche esisteva “il centro di calcolo”, una sala enorme piena di strumenti ingombranti a cui l’utente non poteva accedere. Si comunicava, pensate un po’, mediante schede perforate che venivano preparate con appositi apparecchi

e lasciate fuori, in attesa che il personale le ritirasse. E bisognava aspettare ore prima che il tabulato di uscita venisse consegnato (per scoprire, magari, di aver sbagliato un dato e dover ricominciare l'attesa). Il personal computer era uno strumento nuovo, che iniziava appena ad arrivare sulle scrivanie dei professionisti, ed i programmi di calcolo in pratica non esistevano, ognuno doveva farseli da se.

Quel libro era, ovviamente, figlio di quell'epoca. L'approccio teorico e lo sviluppo applicativo, contenuti nelle prime due parti del testo, "teoria" ed "esempio", erano molto più semplici di quelli odierni. L'effetto del sisma era valutato mediante l'analisi statica e lo schema strutturale era risolto ripartendo il tagliante sismico tra i diversi telai piani dell'edificio. Alle prime due parti ne seguiva una terza dedicata ai "programmi", che spaziava da problemi di una certa consistenza, come la risoluzione di schemi intelaiati piani e spaziali, ad altri che oggi appaiono quasi banali perché facilmente risolvibili con un semplice foglio di calcolo. Tuttavia, anche rileggendo il testo a distanza di tempo, si ritrovano i concetti fondamentali, validi ancora oggi, ed il prodotto ottenuto (cioè la struttura progettata nell'esempio) non sfigura – né come sezioni né come armature – se la si verifica con la normativa più recente, segno di quella continuità che questo nuovo testo intende con forza rimarcare.

Gli anni sono passati, portando nuove conoscenze ma soprattutto strumenti di calcolo infinitamente più potenti. La necessità di aggiornare quel libro cresceva e la convinzione che fosse giunto il momento di farlo maturò nel 2003, quando l'Ordinanza 3274 sembrò imporre ai tecnici un rapido aggiornamento delle procedure per l'analisi delle strutture in zona sismica.

Nasce così questo nuovo libro, condiviso con Pietro Lenza, sulla base della comune formazione culturale e della comune passione nella didattica, svolta rispettivamente a Catania e Napoli.

Le innovazioni contenute nell'Ordinanza, che metteva al centro dell'attenzione gli stati limite, i moderni principi di ingegneria sismica, il diverso approccio progettuale basato anche sulla duttilità e non solo sulla resistenza, avevano infatti già trovato spazio nei corsi universitari ma non nel mondo professionale. Entrambi sentivamo quindi come docenti un certo imbarazzo ad orientare le nuove generazioni ad una concezione della progettazione strutturale che non avrebbe trovato pieno riconoscimento nella prassi professionale corrente, determinando quindi quasi una difficoltà di dialogo, anche lessicale, tra i nuovi ed i vecchi professionisti. L'Ordinanza spazzava via le nostre incertezze ed evidenziava la necessità di estendere l'aggiornamento a tutto il mondo professionale. Il successo delle numerose iniziative in tal senso, promosse dagli Ordini professionali ed alle quali anche noi, come tanti altri colleghi, collaborammo dimostrò il grande interesse dei professionisti a queste problematiche. Non si possono però nascondere le forti resistenze di molti, dettate dalla paura di abbandonare una via nota e dalla complessità che sembrava presentare la nuova via da percorrere. Complici, in questo, anche molti

produttori di software che pubblicizzavano il loro prodotto come l'unica soluzione possibile per affrontare il calcolo strutturale senza pensieri (o senza pensare?).

Forse anche per questo motivo i “tempi” di questi cambiamenti sono diventati molto più lunghi di quelli inizialmente previsti. L'inizio del 2009 ha visto una ulteriore proroga della definitiva entrata in vigore delle nuove norme, proroga della quale si prevede un ridimensionamento dopo il sisma che ha colpito L'Aquila. Nel frattempo però la normativa ha avuto continui cambiamenti, sicché la redazione di questo libro ha subito una successione di *stop and go* fino alla decisione attuale di licenziarne il testo e di allegare ad esso un cd che consente un approfondimento delle problematiche discusse (grazie ai numerosi articoli e libri riportati in formato pdf) e degli esempi progettuali (grazie agli elaborati grafici, alle relazioni di calcolo ed ai programmi allegati). Questo periodo di turbolenza, che si spera sia giunto al termine, ci ha infatti convinto che è indispensabile per gli operatori tecnici acquisire quel senso critico che consente di distinguere i *principi* (stabili) dalle *regole applicative* (mutevoli) ed inoltre di saper riconoscere nelle nuove disposizioni, spesso complesse nella loro applicazione, sostanzialmente la razionalizzazione delle tradizionali *regole di buona progettazione*, a volte contenute nei libri ma più spesso trasmesse attraverso l'insegnamento e la pratica professionale. Questo lungo periodo di gestazione è stato utile anche alle nostre riflessioni e ci ha aiutato a comunicare ai lettori un messaggio di continuità, che sdrammatizza il cambiamento.

Se saremo riusciti nell'intento dovremo ringraziare innanzitutto i nostri studenti di Catania e di Napoli, perché gli studenti (un po' come i bambini nei confronti dei genitori) chiedono sempre il “perché” delle cose che gli si dice e... pretendono risposte convincenti. Un gradito contributo critico costruttivo è venuto dalle discussioni con amici e colleghi, in particolare Bruno Calderoni, Carlo Majorano e Antonio Perretti, e dai partecipanti ai corsi di aggiornamento, come quelli recentemente organizzati da Aurelio Gheresi a Spoleto.

Ringraziamo ancora tutti coloro che hanno collaborato alla nostra attività didattica, di cui questo libro è una testimonianza: Emilia Cordasco e Gaetana Pacella a Napoli, Pier Paolo Rossi, Edoardo Marino, Marco Muratore e Melina Bosco a Catania.

Da Aurelio Gheresi un ringraziamento speciale alla moglie Lia, che con tanta pazienza e comprensione lo ha indirettamente aiutato a scrivere queste pagine, ed un saluto ad un amico che non c'è più, che si era scherzosamente prestato per una foto inserita nel libro.

Vogliamo infine dedicare questo lavoro a Michele Pagano, nostro comune maestro, che già in anni lontani aveva indicato quella concezione strutturale unitaria dell'edificio che la condizione sismica ha reso irrinunciabile.

Aurelio Gheresi

Pietro Lenza

Capitolo 1

PROFILO STORICO DELL'ANALISI STRUTTURALE E DELLA NORMATIVA TECNICA IN ZONA SISMICA

1. Una recente “rivoluzione”

La storia dell'analisi strutturale è sempre stata correlata a quella della normativa tecnica. Per tutto il XX secolo il quadro normativo italiano si è evoluto con molta lentezza ma con continuità. Molte innovazioni proposte dal mondo scientifico, come il metodo degli stati limite, sono state man mano inserite nelle norme, ma presentate come facoltative. Il mondo professionale ha però preferito, in genere, la via più facile ed ha continuato a seguire la prassi progettuale tradizionale, basata sul calcolo elastico alle tensioni ammissibili, accentuando così progressivamente il distacco rispetto all'evoluzione della ricerca scientifica.

Questa situazione è stata improvvisamente sconvolta nel 2003 dalla emanazione, da parte del Dipartimento della Protezione Civile, dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 *“Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”*. Di colpo i progettisti strutturali sono stati messi di fronte a problematiche e concetti che erano stati sviluppati gradualmente nella seconda metà del XX secolo e obbligati a tenerne conto, entro un margine di tempo relativamente breve. L'emanazione di questa Ordinanza (e delle sue successive modifiche) costituiva peraltro una anomalia nel “sistema” della normativa tecnica nazionale, incardinata in due leggi fondamentali, 1086/71 e 64/74 (successivamente assorbite dal Testo Unico per l'Edilizia, DPR 380/01), che prevedevano un aggiornamento periodico mediante Decreti Ministeriali, in pratica scavalcata dalla citata Ordinanza. Le reazioni, più spesso negative che positive, le battaglie in sostegno o in opposizione a tale norma, ma anche lo sforzo di tanti professionisti ad aggiornarsi, appartengono alla storia recente della vita professionale dell'ingegnere italiano.

Oggi il quadro normativo si è ricomposto, perché con la emanazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni (ultima versione del 14/1/2008) il Ministero competente da un lato si è riappropriato delle sue prerogative ma dall'altro ha recepito in maniera sostanziale il contenuto innovativo delle citate Ordinanze, prevedendo, anche per il futuro, l'aggiornamento delle norme tecniche di concerto con la Protezione Civile.

L'emanazione di una nuova normativa è sempre un momento importante nella vita degli operatori tecnici che si occupano a vario titolo di strutture ed ha un notevole impatto sia sull'attività professionale che sulla didattica universitaria, determinando una necessità di "aggiornamento" delle procedure e delle conoscenze. Ogni nuova norma non deve però essere accolta acriticamente, perché sarà proprio la sua applicazione su larga scala ad evidenziare la necessità di future modifiche migliorative.

In questa fase è sicuramente importante capire in che modo devono essere applicate le nuove norme e quali saranno il nuovo approccio e le nuove procedure per la verifica di strutture in zona sismica. Più importante è collegare queste procedure ai problemi reali del comportamento della struttura durante un evento sismico, perché le innovazioni proposte dalla ricerca scientifica non sono altro che risposte a problemi concreti. Ma ancora più importante, infinitamente più importante, è recuperare l'aspetto progettuale. Progettare è ben più che verificare ed il progettista strutturale non deve ridursi a colui che mette dati al computer e li modifica a tentativi, fino ad ottenere l'assenso del programma di calcolo. Il buon progettista "sente" il comportamento della struttura e modifica quest'ultima in modo da ottimizzarlo. E lo fa nel rispetto delle norme, ma anche al di là delle norme. Nonostante ciò che dicono alcuni tra i più strenui fautori della nuove norme, è nostra ferma convinzione che chi nel passato ha progettato in maniera cosciente, tenendo conto anche dei consigli di "buona progettazione", spesso non scritti ma comunque tramandati dai professionisti più esperti, ha prodotto qualcosa che è ancora sostanzialmente valido. A questo spirito e a questo modo di procedere speriamo di dare un nostro piccolo contributo col presente testo.

2. Evoluzione storica del concetto di sicurezza

Il quadro normativo attuale è il punto di arrivo di un percorso culturale che vede il concetto di sicurezza strutturale svilupparsi e tradursi in prescrizioni normative.

La Scienza, intesa nel senso moderno o Galileiano, ha cercato di sostituire le cosiddette "regole dell'arte", basate unicamente sull'esperienza, con prescrizioni operative motivate da modelli fisico-matematici. La prima "prescrizione"

in senso moderno può forse ritrovarsi nelle lezioni di Navier (1826), quando si afferma che il proporzionamento delle sezioni resistenti deve essere tale che i materiali restino sicuramente in campo elastico nelle condizioni di servizio in modo da evitare deformazioni permanenti. In questa indicazione (che rimane comunque una autorevole raccomandazione, anche quando non espressamente recepita nel codice normativo) si possono riconoscere i fondamenti del calcolo elastico e quindi del metodo delle tensioni ammissibili. Verificare che le sollecitazioni prodotte dai carichi di esercizio non provochino deformazioni plastiche e quindi permanenti del materiale si traduce nella disuguaglianza

$$\sigma_{es} \leq \frac{\sigma_u}{\gamma}$$

ove γ rappresenta un coefficiente di sicurezza stabilito sulla base di considerazioni non esplicitamente probabilistiche (deterministiche).

In realtà questa filosofia della sicurezza venne tradotta in una vera e propria normativa solo con la diffusione del conglomerato cementizio armato, nuovo rivoluzionario materiale strutturale le cui straordinarie capacità determinavano sicuramente grande attenzione e preoccupazione da parte dell'autorità. Il criterio delle tensioni ammissibili viene infatti recepito nella circolare ministeriale francese del 1906 e, l'anno successivo, in un'analoga norma italiana (D.M. 10/1/1907) intitolata "Prescrizioni normali per l'esecuzione delle opere in cemento armato". Si noti in particolare che il metodo consente di differenziare il coefficiente di sicurezza con riferimento ai due materiali strutturali, calcestruzzo ed acciaio.

La tappa successiva vede la valorizzazione del calcolo a rottura. La sicurezza viene valutata come rapporto tra la caratteristica di sollecitazione a rottura della sezione M_R , determinata sulla base dei valori ultimi di resistenza e deformazione dei materiali, e quella di esercizio M_E

$$M_E(F_k) \leq \frac{M_R(f_{ck}, f_{yk})}{\gamma}$$

Il nuovo metodo venne incluso nel 1938 nella normativa sovietica sul cemento armato. Esso si ispira all'effettiva capacità portante della sezione ma non è più possibile differenziare il coefficiente di sicurezza tra i due materiali.

È ancora il regolamento sovietico nel 1955 a recepire un ulteriore progresso nella valutazione della sicurezza, introducendo il concetto di "stato limite", esteso dalla crisi per resistenza a quella per deformazione o fessurazione e, specialmente, riconoscendo operativamente il carattere probabilistico delle variabili da cui dipendono le verifiche di sicurezza. Vengono infatti indicati due coefficienti di sicurezza orientati ad interpretare le incertezze rispettivamente nella valutazione dei carichi e della resistenza dei materiali. Formalmente la nuova concezione della sicurezza si riconduce all'espressione

$$M_E(\gamma_F F_k) \leq M_R \left(\frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \right)$$

I momenti che compaiono nella precedente espressione sono denominati “di calcolo” e si ottengono considerando rispettivamente i carichi caratteristici amplificati e le resistenze caratteristiche dei materiali ridotte. In tal modo vengono considerate azioni che hanno una probabilità del 99,5% di non essere superate e resistenze che hanno la medesima probabilità di esserlo; ciò determina una non ben precisata ma comunque molto alta probabilità che la suddetta disuguaglianza venga rispettata. Viene inoltre recuperata la possibilità di differenziare i coefficienti di sicurezza dei due materiali strutturali.

Il metodo semiprobabilistico agli stati limite, che si andava delineando in quegli anni, trova piena applicazione nella normativa italiana nel 1980, ma già dal 1972 era stato ammesso il calcolo a rottura della sezione. Come si è detto in precedenza questo approccio costituisce, da oggi in poi, il prevalente metodo di verifica della sicurezza. Il termine semiprobabilistico ricorda che in effetti non viene misurata la probabilità che il momento agente superi quello di rottura (come sarebbe da attendersi da un metodo probabilistico) ma viene solo misurata la probabilità relativa all’entità delle azioni e quella relativa alla resistenza dei materiali.

Se pensiamo ad un sintetico confronto tra i due metodi osserviamo che, nonostante un’apparente grande diversità:

- i coefficienti di sicurezza deterministici impiegati nel metodo delle tensioni ammissibili hanno in realtà un carattere implicitamente probabilistico;
- la lista completa degli stati limite viene in qualche modo recuperata, operando con le tensioni ammissibili, mediante ulteriori verifiche (deformazione, fessurazione, instabilità, equilibrio del corpo rigido), regolamentate sempre con criteri formalmente deterministici.

Il metodo semiprobabilistico conferisce però centralità al comportamento non lineare della sezione, limitando il calcolo elastico solo a verifiche rispetto a stati limite di esercizio.

È infine da osservare che ciascun metodo prescinde, di per sé, dalla scelta del modello strutturale che fa da interfaccia tra le azioni applicate e le caratteristiche della sollecitazione. La possibile diversa modellazione dell’elemento strutturale (ad esempio come trave isolata, trave continua, telaio piano o spaziale, ecc.) può però condurre a risultati numerici molto diversi. È proprio la modellazione strutturale, intesa come interpretazione schematica della realtà, la sfera di maggiore libertà e responsabilità del progettista strutturale. La tendenza attuale della normativa tecnica, e in special modo di quella sismica, è quella di fornire suggerimenti o prescrizioni anche sul modello di calcolo da adottare, ma questa scelta rimane ancora un aspetto fondamentale e critico della progettazione strutturale.

3. Evoluzione storica della strategia di difesa dai terremoti

L'aspetto sismico del problema strutturale è diventato sempre più importante, specialmente in riferimento alla situazione italiana. L'obiettivo di realizzare strutture in grado di sopportare i terremoti più violenti è perseguito, con studi scientifici e prescrizioni normative, da oltre due secoli. Esaminando lo sviluppo della normativa sismica nazionale, non si può non notare come esso sia sempre in stretta relazione con i terremoti storici. I provvedimenti più antichi sono probabilmente quelli del 28 marzo 1784, emanati dal Governo borbonico dopo il terremoto che devastò la Calabria nel 1783. Ma questi, come tutti quelli che si susseguirono fino all'inizio del ventesimo secolo (regolamento pontificio edilizio per la città di Norcia, 1860; prescrizioni edilizie per l'isola d'Ischia, 1883; norme per la costruzione ed il restauro degli edifici nei comuni liguri danneggiati dal terremoto del 22 febbraio 1887; norme per la costruzione ed il restauro degli edifici danneggiati dal terremoto nelle province calabresi ed in quella di Messina, 1906) si limitavano a prescrizioni costruttive e limitazioni dell'altezza degli edifici.

Solo dopo il terremoto di Messina del 28 dicembre 1908 venne promulgata una norma (R.D. 18 aprile 1909, n. 193) che prevedeva esplicitamente la necessità di tenere conto nei calcoli di stabilità e resistenza delle costruzioni di "azioni dinamiche dovute al moto sismico ondulatorio, rappresentandole con accelerazioni applicate alle masse del fabbricato"¹. L'entità delle massime accelerazioni prodotte da un terremoto era, all'epoca, oggetto di discussione. La scala sismica proposta dal giapponese Omori considerava possibili accelerazioni massime superiori a 4 m/s^2 (0.4 g, indicando con g l'accelerazione di gravità) e questo valore veniva posto a base dei calcoli da alcuni autori. Ciò nonostante, la commissione incaricata di predisporre le norme del 1909 sottolineò le incertezze esistenti su tale punto e l'improponibilità di usare tali accelerazioni nel progetto, perché esse avrebbero portato "a risultati praticamente inattendibili a cagione delle eccessive dimensioni che ne scaturirebbero adottando gli abituali carichi di sicurezza datici dalla scienza della resistenza dei materiali da costruzione". Si decise quindi di "dedurre direttamente per determinati tipi di fabbriche, di cui si sia constatata l'incolumità in un numero abbastanza grande di casi, quali siano le forze massime che ... avrebbero potuto essere sopportate dall'edificio, per servirsene poi nel calcolo di fabbricati nuovi". Gli studi svolti portarono alla conclusione che "le forze convenzionali da introdurre nei calcoli ... corrisponderebbero ad una accelerazione di 700 ad 800 mm per secondo al quadrato" (cioè 0.07-0.08 g). Si propose quindi di utilizzare forze orizzontali pari a "1/12 dei rispettivi pesi per le strutture dei piani inferiori", aumentate a "1/8 per quelle del

¹ Tutte le citazioni sono tratte dalla "Relazione della Commissione incaricata di studiare e proporre norme edilizie obbligatorie per i comuni colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 e da altri anteriori" pubblicata sul Giornale del Genio Civile, 1909.

piano superiore²” per tener conto del fatto che “l’ampiezza delle oscillazioni provocate dai terremoti negli edifici aumenta dai piani inferiori ai superiori”. C’era comunque la consapevolezza che “un edificio calcolato per l’accelerazione sopra indicata, secondo gli ordinari carichi di sicurezza, si dovrà considerare come resistente in buone condizioni ad una scossa di accelerazione doppia, la quale non dovrebbe provocarvi tensioni unitarie superiori ai limiti pratici di elasticità dei rispettivi materiali, e darà garanzia contro il pericolo di uno sfasciamento disastroso anche per scosse di intensità quattro o cinque volte più grandi”.

Il terremoto di Messina del 1908 rivelò in particolare la vulnerabilità degli edifici in muratura con solai in legno o ferro semplicemente appoggiati alle murature, per il collasso delle pareti fuori dal proprio piano. Ne seguì la disposizione (1935) che vietò tali tipologie, imponendo l’impalcato in c.a. con cordoli di incatenamento inseriti tra gli ordini delle murature.

I primi edifici in c.a. utilizzavano le murature di tamponamento (realizzate in muratura piena) per irrigidire le maglie dei telai al fine di assorbire le azioni orizzontali. La normativa del 1935 consentiva esplicitamente di tener conto di tale contributo irrigidente e resistente. Dopo il 1962, invece, non fu più consentito di prendere in considerazione le tamponature (che peraltro venivano realizzate sempre di più con laterizi alleggeriti) ed esse divennero semplici “carichi fissi”. Dopo il terremoto Irpino-Lucano del 23 novembre 1980 la normativa regionale finalizzata al recupero dell’edilizia esistente consentì nuovamente di tenerne conto, ma solo nell’ambito dei suddetti interventi.

Come si vede, fin dalle prime normative risalenti all’inizio del secolo scorso erano presenti, in nuce, i concetti base dell’analisi sismica: comportamento elastico lineare per terremoti deboli, comportamento non lineare per terremoti più forti, uso di forze statiche per simulare gli effetti del reale comportamento dinamico. Solo dopo la metà del ventesimo secolo il progresso teorico e la disponibilità di nuovi mezzi di calcolo consentirono una migliore comprensione, anche dal punto di vista numerico, del problema. L’analisi della risposta sismica di oscillatori elastoplastici mostrò che una progettazione basata su un’analisi lineare con forze ridotte può garantire una sufficiente sicurezza nei confronti del collasso solo se la struttura possiede un’adeguata duttilità. Le normative più recenti, come l’Eurocodice 8, hanno quindi previsto criteri per conferire un buon comportamento globale (*capacity design*, o criterio di gerarchia delle resistenze) e hanno indicato dettagli costruttivi per incrementare la duttilità locale. Rimane tuttavia, come punto debole, il fatto che non sia previsto un esplicito controllo della duttilità della struttura. La garanzia di un buon comportamento ultimo è quindi basata sull’extrapolazione di risultati teorici alle strutture reali, spesso ben diverse dai modelli di calcolo.

² La norma proposta prevedeva che fossero consentiti al massimo due piani.