

SICUREZZA E PRESTAZIONI DELLE STRUTTURE COME RISULTATO DI PROCESSO DI SISTEMA

Franco Bontempi *

*** Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Via Eudossiana 18, 00184 ROMA, ITALIA**

Sommario. *Questo contributo vuole illustrare la visione, l'organizzazione logica ed alcuni aspetti del quadro normativo delineato dalla pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale del 23 settembre 2005 del D.M. 14/09/05, Testo Unitario delle Norme Tecniche per le Costruzioni.*

1. INTRODUZIONE

Nel presente contributo è principalmente illustrata la visione che sta alla base del corpo delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale del 14 settembre 2005, *Testo Unitario* [1]. È specifico di questo testo avere alla base una logica unitaria e razionale, che differenzia questo quadro da altri che appaiono non così altrettanto coesi.

Avere una visione, nell'accezione mutuata dai sistemi qualità, vuol dire avere un punto focale verso cui costantemente dirigersi, attivando tutte le risorse opportune e necessarie per arrivarvi.

Nel *Testo Unitario*, tale fine è quello di tendere a costruzioni sicure ed efficaci in termini prestazionali, avendo presenti tutte le incompletezze insite nel mondo reale, sia incertezze legate agli aspetti naturali (quali, ad esempio, le definizioni delle caratteristiche dei materiali e delle azioni), sia legate al comportamento umano (quali insufficienze ed obliquità dell'agire umano). Questo modo di procedere è detto sistemico: in un sistema si considerano contemporaneamente sia le singole parti, sia come queste interagiscono tra loro.

È probabilmente questa visione unitaria, altrimenti definita come lo “spirito olistico” del *Testo Unitario* [2], che rappresenta probabilmente la principale novità del presente testo normativo. Questa unitarietà trascende dai molti particolarismi che, forse, in passato hanno distratto l'attenzione degli operatori del processo delle costruzioni, creando situazioni talvolta sia insicure sia inefficienti. Questo vale in particolare per i Progettisti: a tal riguardo, basta pensare ad esempio al peso dato alla definizione minuziosa di possibili carichi e all'onere delle combinazioni per le verifiche, in particolare nel formato dei coefficienti parziali che implementa il Metodo agli Stati Limite, in confronto alla attenzione dedicata ai principi strutturali fondamentali che devono guidare il progetto.

Questa “misdirection”, è probabilmente insita in un codice normativo prescrittivo, quale essenzialmente era il quadro precedente al D.M. 14/09/05. In tale quadro prescrittivo, trovavano spazio fondamentalmente molte regole specifiche, che venivano scrupolosamente e mnemonicamente applicate senza un'adeguata critica sia sui presupposti a tali regole (ipotesi alla base e contesto di applicabilità), sia sugli effetti conseguenti.

Questo modo di applicazione delle regole tecniche, se da una parte in casi semplici è sufficiente ed efficiente, in sempre più numerose situazioni specifiche risulta non solo non efficace ma anche insicuro: in queste situazioni, infatti, gli Operatori, ed in particolare i Progettisti, sono accecati da particolarismi che rischiano di far perdere di vista cosa è veramente importante nel progetto in esame. Si rischia inoltre di attivare circoli viziosi, in cui il solo aver rispettato ricette preordinate sembra sollevare da responsabilità.

A questo proposito, è probabilmente il dovere di esplicitare gli obiettivi di un progetto, ovvero costringere i vari portatori di interesse, ed in particolare il Progettista, a dichiarare cosa si vuole e come si vuole ottenerlo, il maggior pregio di uno spirito prestazionale al progetto. Il D.M. 14/09/05 non solo supporta tale pratica, ma lo esige, in particolare richiedendo effettive assunzioni di responsabilità ai vari soggetti coinvolti.

A parte la presente introduzione e le conclusioni, il presente contributo è suddiviso nelle seguenti parti:

- 2) Il quadro normativo attuale,

- 3) La logica del *Testo Unitario*, costruita sui concetti elementari di qualità, domanda, prodotto, controllo,
- 4) Progettazione prestazionale delle costruzioni, con i due strumenti allo stesso tempo concettuali ed operativi di scomposizione prestazionale e scomposizione strutturale,
- 5) Il ruolo dell'analisi strutturale,
- 6) Requisiti strutturali e criteri di progettazione.

2. IL QUADRO NORMATIVO ATTUALE

Il *Testo Unitario* delle Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. 14/09/05 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 23 settembre 2005, si inserisce e si integra in un quadro normativo fortemente caratterizzato dalle interazioni fra diverse tipologie di norme, disponibili sia a livello nazionale che europeo.

Per quanto riguarda l'Unione Europea, il quadro normativo è differenziato in due distinte famiglie di normative:

- 1) norme di prodotto (Norme Armonizzate - *ENh*, o Benestari Tecnici Europei - *BTE*), che “armonizzano”, in maniera condivisa nell'intera UE, le norme degli Stati membri per quanto riguarda le caratteristiche richieste ai materiali ed ai prodotti da costruzione; tali norme costituiscono il riferimento per la “marcatura CE sui prodotti da costruzione”, cogente in virtù della Direttiva 89/106/CE sui prodotti da costruzione, recepita in Italia con il D.P.R. 246/93;
- 2) norme di progetto delle opere, i cosiddetti “*Eurocodici*”, non cogenti e soggetti a continua evoluzione, che richiedono, per la loro compiuta applicazione, l'elaborazione dei *Documenti di Attuazione Nazionale* da parte degli Stati membri.

A livello nazionale, invece, il riferimento normativo, è costituito dalle Leggi 1086/71 e 64/74, nonché dal Testo Unico per l'Edilizia (DPR 380/01), e dai relativi decreti di attuazione, ad oggi integralmente sostituiti dal citato D.M. 14/09/05.

Quest'ultimo, a circa tre decenni di distanza dall'ultima norma organica emanata, soddisfa l'esigenza di un riordino sistemico delle normative tecniche e viene incontro alla richiesta fortemente sentita nel campo della costruzione delle opere civili, di avere un riferimento normativo con caratteristiche di coerenza, chiarezza, sinteticità e improntato al più moderno indirizzo di normazione prestazionale piuttosto che prescrittiva. In tal senso il D.M. 14/09/05 impone, in senso cogente, i livelli di sicurezza ammessi per le costruzioni in Italia e i metodi per la loro valutazione.

Inoltre, questo Decreto si coordina con il citato quadro normativo nazionale ed europeo: il D.M. 14/09/05, infatti, include per l'Italia entrambi gli aspetti di norma di progetto e norma di prodotto.

Come norma di prodotto, il *Testo Unitario* detta le condizioni per l'identificazione, la certificazione e l'accettazione dei materiali e prodotti strutturali, ed in tale veste richiama le norme europee di prodotto eventualmente disponibili, che in virtù del DPR 246/93 prevalgono sul *Testo Unitario*.

Come norma di progettazione delle opere, il D.M. 14/09/05 assolve la funzione esclusivamente nazionale di dettare, in forma cogente, i livelli di sicurezza e le prestazioni attese per le opere. In tale veste, e solo per quanto riguarda le possibili regole di dettaglio e applicative per la realizzazione dei livelli di sicurezza definiti, il D.M. 14/09/05 concede la possibilità di utilizzare, in forma volontaria e nel rispetto dei livelli di sicurezza definiti, diverse norme: gli stessi Eurocodici (di cui il D.M. 14/09/05 costituisce il naturale riferimento per la prossima formalizzazione dei Documenti di Attuazione Nazionale), gli Allegati 2 e 3 all'Ordinanza del P.C.M 3274/03 e successive modificazioni riguardanti le costruzioni in zona sismica, codici internazionali riconosciuti, commentari e Linee Guida emessi e approvati dal Consiglio Superiore dei LL.PP., istruzioni CNR, norme UNI.

Infine, da questo breve quadro emerge la possibilità di classificare le varie norme richiamate a vario titolo nel D.M. 14/09/05, come:

- Norme cogenti, da rispettare obbligatoriamente (per legge), costituite dal D.M. 14/09/05 stesso e dalle norme in esso richiamate con riferimenti tipo “*devono essere conformi a*”; ad esempio, le norme armonizzate (come le EN 10025 per l'acciaio da carpenteria metallica, la EN 12620 per gli aggregati per conglomerato cementizio, etc.) o le Linee Guida di Benessere Tecnico Europeo (per esempio l'ETAG013 per i sistemi di precompressione a cavi post-tesi).
- Norme di supporto a norme cogenti, richiamate nelle suddette norme cogenti e utili alla loro applicazione, come le norme europee di prova (es. EN 15630 per i metodi di prova per l'acciaio da c.a.), tipicamente richiamate nel testo del D.M. 14/09/05 con diciture simili alla seguente “*prove effettuate conformemente alle EN [...] o UNI [...]*”.
- Norme volontarie, richiamate nel testo, ad esempio nel modo seguente: “*il Progettista potrà fare riferimento alle EN [...]*”, costituite ad esempio da Norme Europee non armonizzate (es. EN 206 per il conglomerato), da norme di qualificazione di processo (es. serie EN 9000, EN 45000, EN 17000), da norme sull'esecuzione (es. EN13670 per le strutture in calcestruzzo o EN 1090 per le strutture in acciaio).

E' da osservare, infine, che le leggi in virtù delle quali il D.M. 14/09/05 assume valore, le Leggi 1086/71 e 64/74 coordinate oggi nel TU per l'edilizia, DPR 380/01, definiscono il quadro delle responsabilità dei soggetti coinvolti, e le relative sanzioni in caso di inadempienza degli stessi soggetti.

3. LA LOGICA DEL TESTO UNITARIO

Dopo circa un decennio dall'emanazione dell'ultimo decreto ministeriale sulle costruzioni (il D.M. 16/01/96), il 14 settembre del 2005 è stato emanato il cosiddetto *Testo Unitario* delle Norme Tecniche sulle Costruzioni, ovvero il D.M. 14/09/05.

Come accennato, lo scopo essenziale di tale decreto ministeriale è la definizione del livello di sicurezza da garantire alle opere e alle costruzioni, oltre che la definizione dei doveri e delle responsabilità dei vari soggetti coinvolti (Committente, Progettista, Produttore, Costruttore, Direttore dei lavori, Collaudatore, Gestore, etc.) al fine di

ottenere tali livelli di sicurezza.

Secondo una lettura che esamini complessivamente il *Testo Unitario*, dove sono affrontati in maniera coerente ed organizzata in circa quattrocento pagine tutti gli aspetti relativi alle costruzioni, si può individuare la suddivisione mostrata in Figura 1. Tale sistemazione razionale è basata sui seguenti quattro concetti logici:

- **QUALITA'**,
- **DOMANDA**,
- **PRODOTTO**,
- **CONTROLLO**.

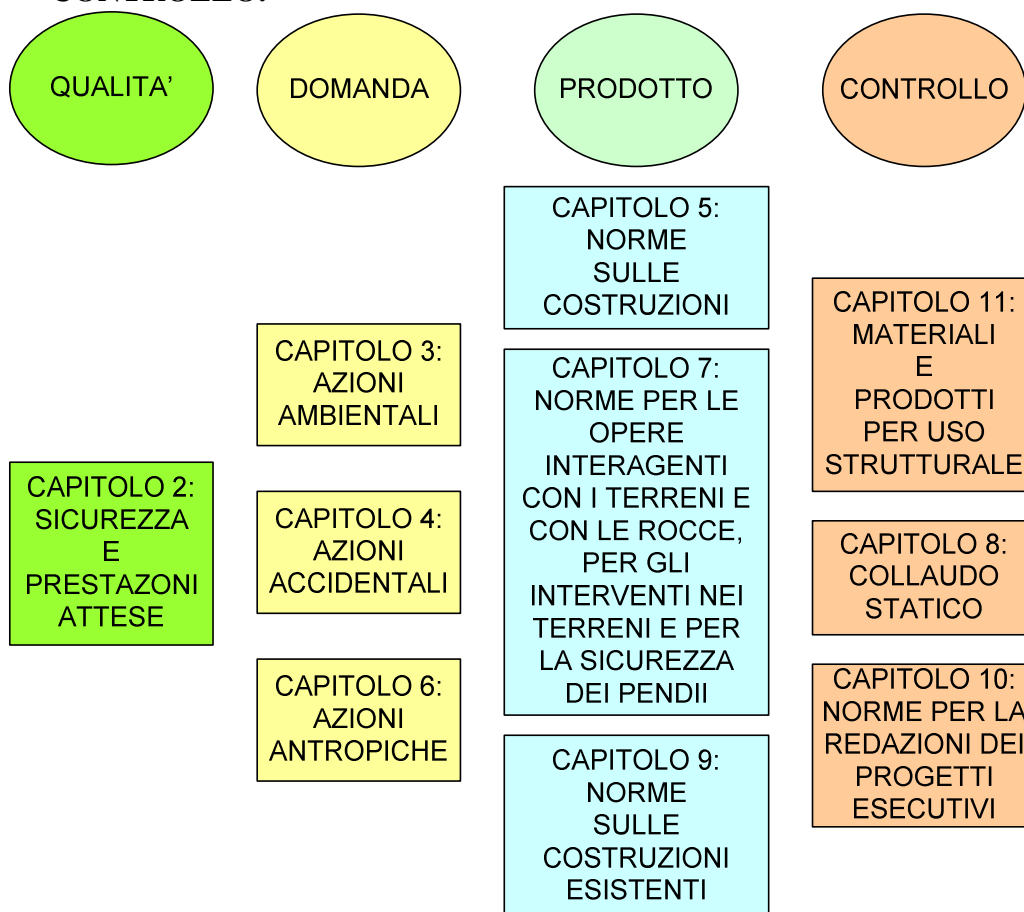


Figura 1: Sistemazione logica del *Testo Unitario* delle Norme Tecniche sulle Costruzioni, D.M. 14/09/05.

Questo tipo di visione è tipico dell'Ingegneria dei Prodotti Industriali e invece poco diffusa nell'Ingegneria Civile. Proprio per questo, appare pertanto utile analizzare più nel dettaglio tale inquadramento logico.

QUALITA'

Nel Capitolo 2 del *Testo Unitario*, si definiscono le esigenze e gli obiettivi della norma, ovvero le qualità che devono avere le costruzioni dell'Ingegneria Civile: da una parte si ha la sicurezza, ovvero la necessità che le costruzioni assicurino la pubblica incolumità, che quindi non provochino danni ai beni o alle persone, e dall'altra riguardano le

prestazioni funzionali, legate al normale utilizzo delle opere.

Il raggiungimento di questi obiettivi non può essere garantito con assoluta certezza e, dunque, realisticamente il *Testo Unitario* imposta le verifiche in termini probabilistici, fissando un'adeguatamente bassa probabilità di insuccesso. Questa probabilità di insuccesso è ovviamente graduata in base alle conseguenze dell'eventuale insuccesso.

Un ulteriore obiettivo esplicitamente ricercato riguarda la robustezza strutturale, intesa come la capacità della costruzione di rispondere in maniera ragionevole e proporzionale a quelle situazioni che sono legate ad eventi usualmente definiti come "accidentali" o incidenti, non previsti, non prevedibili ma non per questo escludibili a priori.

Nel Capitolo 2 (§2.1) si formalizzano i precedenti aspetti rispettivamente attraverso la definizione degli Stati Limite, Ultimo e di Esercizio, e della Robustezza Strutturale:

- a) lo Stato Limite Ultimo (S.L.U.), definito come "*.. lo stato al superamento del quale si ha il collasso strutturale, crolli, perdita di equilibrio, dissesti gravi, ovvero fenomeni che mettono fuori servizio in modo irreversibile la struttura*" (§2.2.1);
- b) lo Stato Limite di Esercizio (S.L.E.), definito come "*... lo stato al superamento del quale corrisponde la perdita di una particolare funzionalità che condiziona o limita la prestazione dell'opera*" (§2.2.2), che riguarda la funzionalità della costruzione, ovvero la fruizione agli scopi che hanno fatto partire il progetto dell'opera;
- c) la Robustezza Strutturale, definita come "*capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescenti quali incendio, esplosioni, urti o conseguenze di errori umani*" (§2.1).

Nel caso di costruzioni soggette ad azione sismica, si introduce poi l'ulteriore Stato Limite di Danno (S.L.D.): questo stato limite si pone fra gli Stati Limite di Esercizio e quelli Ultimi, riguardando un grado più o meno esteso di danneggiamento, da definire caso per caso e con conseguente perdita di funzionalità della costruzione quando sottoposta all'azione sismica.

Significativamente, in accordo con la generale impostazione prestazionale del progetto, le verifiche sulla qualità strutturale devono essere svolte:

- 1) all'atto della redazione del progetto, con riferimento a caratteristiche meccaniche dei materiali presunte, ricavate utilizzando correlazioni di letteratura, e ad una caratterizzazione geotecnica del terreno elaborata sulla base di indagini preliminari al progetto. Il progettista dovrà descrivere il processo costruttivo e verificare che, nelle fasi costruttive intermedie, la struttura non sia cimentata in maniera più gravosa di quella prevista nello schema finale; le verifiche per queste situazioni saranno con-dotte nei confronti dei soli stati limite ultimi (verifica as-designed).
- 2) ad opera eseguita, ovvero durante la costruzione ed il collaudo in corso d'opera, con riferimento alle caratteristiche meccaniche dei materiali misurate con prove sperimentali, ai processi costruttivi adottati e alle diverse configurazioni di conseguenza assunte dalla struttura in fase costruttiva, alle caratteristiche reologiche dei materiali impiegati ed alla caratterizzazione del terreno definita, mediante prove durante la re-alizzazione dell'opera, tenendo conto anche della

rilevanza della interazione terreno-struttura (verifica as-build).

Il raggiungimento di questi obiettivi non può avvenire per un tempo indeterminato: tutti gli oggetti fisici, e quindi tutte le opere, sono soggette a degrado termodinamico. Inoltre gli eventi attesi rispetto ai quali si deve garantire la sicurezza (le azioni) dipendono fortemente dall'orizzonte temporale in cui l'opera deve garantire tale sicurezza (in generale la possibile intensità dell'azione attesa cresce al crescere del periodo di temporale preso in esame). Nel Capitolo 2 è quindi opportunamente fissato un orizzonte temporale graduato in funzione dell'importanza intrinseca dell'opera in esame. Si definiscono, infatti:

- a) Costruzioni di Classe 1, per le quali si fissa la vita utile in 50 anni;
- b) Costruzioni di Classe 2, per le quali si fissa la vita utile di 100 anni;

La scelta di tale classe, non necessariamente limitata a queste due possibilità, è lasciata al Progettista ed al Committente, che la determinano di concerto nell'ambito delle rispettive conoscenze e responsabilità.

Per il prescelto orizzonte temporale, la costruzione deve durevolmente mantenere le sue qualità, che sono fondamentalmente sicurezza, funzionalità, robustezza.

DOMANDA

Il secondo blocco logico individuato nel *Testo Unitario*, considera la cosiddetta "domanda". Con questo termine, si intende indicare l'insieme degli eventi ("azioni"), naturali o artificiali, che la costruzione deve sostenere mantenendo il suo livello di qualità, ovvero restando sicura e funzionale; si definiscono inoltre, per quanto possibile, le azioni accidentali che la struttura deve adeguatamente sopportare (risultando in tal modo robusta). In tale blocco logico di argomenti si possono includere:

- a) il Capitolo 3, Azioni ambientali e naturali, dove sono introdotte le azioni naturali (vento, variazioni di temperatura, neve e sisma) e la loro modellazione; al periodo temporale precedentemente individuato come vita utile della costruzione è associata l'intensità delle azioni naturali attraverso il cosiddetto periodo di ritorno, pari a 10 volte la definita vita utile della costruzione;
- b) il Capitolo 4, Azioni accidentali, dove sono introdotte le azioni accidentali più frequenti, ovvero incendio, esplosioni ed impatto e le relative modellazioni;
- c) il Capitolo 6, Azioni antropiche, dove sono definiti in modo diretto, alle volte anche in modo convenzionale e nominale, le azioni dovute all'uso delle opere, siano edifici o ponti.

Al Progettista, di concerto con il Committente, nell'ambito delle rispettive conoscenze e responsabilità, è lasciata la possibilità di affinare entità e modellazione delle azioni considerate.

PRODOTTO

Il terzo tema logico, dopo aver definito prima gli obiettivi da raggiungere e poi le azioni da considerare, riguarda nello specifico le costruzioni nelle loro varie forme: il "prodotto". Si considerano dunque, nell'ordine,

- a) nel Capitolo 5, Norme sulle costruzioni, le varie tipologie strutturali, ovvero le costruzioni in conglomerato armato, quelle in acciaio, quelle miste, quelle in legno, quelle in muratura e quelle in altri materiali;
- b) nel Capitolo 6, Norme per le opere interagenti con i terreni e con le rocce, per gli interventi nei terreni e per la sicurezza dei pendii;
- c) nel Capitolo 9, le Costruzioni esistenti.

Questo terzo tema raggruppa quindi tutte le indicazioni sulle opere, nuove od esistenti, in tutte le varie forme, considerate come prodotto di tutte le attività dell'Ingegneria Strutturale in ambito Civile.

CONTROLLO

Infine, per garantire nel complesso la qualità dell'intero processo che conduce alla realizzazione di una costruzione, risulta evidentemente necessario individuare attività di "controllo" a vari livelli. In tal senso nel *Testo Unitario* si individuano:

- a) il Capitolo 11, Materiali e prodotti per uso strutturale, che definisce i concetti e le attività necessarie a garantire la qualità dei materiali e dei componenti per uso strutturale; in questo modo, si vuole assicurare che il processo, che terminerà ad opera realizzata, si approvvigioni con elementi idonei;
- b) il Capitolo 8, Collaudo Statico, che definisce i criteri di giudizio dell'opera realizzata nel suo complesso, ovvero le attività di collaudo;
- c) il Capitolo 10, Norme per la redazione dei progetti esecutivi, che riguarda invece i controlli da sviluppare per garantire la qualità della logica che guida la realizzazione dell'opera, ovvero le caratteristiche del progetto nella sua redazione e gli strumenti utilizzati a supporto dello stesso.

4. PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE DELLE COSTRUZIONI

In questi ultimi decenni, la progettazione delle strutture in Italia è stata basata su normative imposte in termini prescrittivi: questo ha significato considerare inviolabili specifiche regole tecniche ed ha implicato considerare fissati molteplici parametri. Tale modo di procedere è stato a lungo giustificato nei casi in cui era in gioco la sicurezza e l'incolumità delle persone, in quanto possibili rilasci normativi avrebbero favorito cambiamenti nella pratica costruttiva ritenuti potenzialmente pericolosi perchè associati a rischi inattesi ed imprevedibili.

Negli ultimi anni è stato registrato un numero consistente di cambiamenti ed innovazioni, in particolare a livello internazionale, che hanno mutato l'impostazione delle attività di progettazione e della pratica costruttiva. Tra questi, meritano di essere menzionati, da una parte, l'utilizzo sempre più intensivo nell'Ingegneria Strutturale di strumenti avanzati di calcolo, ormai sempre più accessibili, e, dall'altra, l'introduzione di materiali innovativi capaci di alte prestazioni. Vanno inoltre segnalati nuovi sistemi di monitoraggio delle opere, significativamente meno onerosi che in passato. Allo stesso tempo, alcune realizzazioni più o meno complesse dell'Ingegneria Strutturale progettate con i metodi tradizionali sono state oggetto di critiche da parte dell'opinione pubblica e dei professionisti del settore perchè le costruzioni hanno spesso evidenziato livelli

prestazionali inadeguati alle necessità.

Un criterio prestazionale è, essenzialmente, una determinazione esplicita delle qualità che il prodotto finito deve possedere per soddisfare una certa prestazione (ad esempio, sicurezza strutturale, sicurezza al fuoco, comfort termico, e così via).

L'espressione *Performance-Based Design (PBD)* indica, in senso letterale, una progettazione basata sulle prestazioni. Nello specifico:

- la progettazione viene condotta con la finalità di mettere in atto tutte le attività e gli interventi necessari affinché il sistema strutturale sia in grado di svolgere con sicurezza le funzioni richieste;
- una prestazione (performance) è un'espressione quantitativa in termini di valore, classe o livello, del comportamento di un'opera, o di una sua parte, a seguito di un'azione a cui la stessa sarà soggetta durante la vita utile ovvero durante il suo utilizzo.

L'obiettivo primario dell'impostazione progettuale basata sulle prestazioni, consiste nel creare un sistema nel quale le prestazioni della struttura in esame sono chiaramente indicate e gli Utenti (Committenti, Proprietari, Utilizzatori) sono chiaramente informati sulle modalità di realizzazione e sui costi di progettazione, supervisione e costruzione da sostenere per ottenerle.

Nell'ambito dell'Ingegneria delle Costruzioni, l'approccio prestazionale coinvolge tutti gli stadi ed i soggetti per arrivare a realizzare una costruzione conforme alle prestazioni richieste; in particolare i soggetti ed i relativi compiti sono qui riassunti:

- Committente e Progettista: definizione delle caratteristiche prestazionali ("quadro esigenziale") dell'opera (vita utile, impiego della costruzione, importanza sociale e strategica, ecc..) e redazione del progetto;
- Costruttore e Produttore: corretta realizzazione della costruzione con garanzia di qualità di materiali e prodotti di base di base e di loro corretto impiego;
- Direttore dei lavori e Collaudatore: controllo di qualità in fase di costruzione e collaudo finale dell'opera a costruzione terminata e verifica delle prestazioni richieste.

Un'impostazione prestazionale ha ricadute sia sulla concezione dell'intera struttura sia sulla scelta dei materiali e dei componenti per uso strutturale inseriti nell'opera. Questa unitarietà di visione (visione sistemica) è proprio una delle peculiarità dell'impostazione prestazionale.

Un materiale o un componente, per definire e rispondere ai requisiti per i quali è utilizzato deve essere (cap. 11):

- Identificato dal Produttore in modo che siano definite le prestazioni, l'idoneità d'impiego, la durabilità, la procedura di impiego e/o installazione e l'eventuale manutenzione.
- Certificato mediante apposita documentazione che attesti la conformità alle prestazioni dichiarate.
- Accettato dal Direttore dei lavori e quindi ritenuto idoneo all'impiego nella costruzione.

LA SCOMPOSIZIONE PRESTAZIONALE

Il *Testo Unitario* prevede il passaggio da un approccio progettuale di tipo puramente prescrittivo a uno di tipo prestazionale, che considera i requisiti che una struttura deve soddisfare piuttosto che come deve essere costruita.

La definizione delle prestazioni di un sistema strutturale assume quindi un ruolo fondamentale. Man mano che il grado di complessità strutturale cresce aumentano anche le variabili da controllare e gestire. Tale complessità può essere affrontata tramite un'adeguata analisi del problema nel suo insieme, attraverso la sua scomposizione in requisiti più facilmente comprensibili e gestibili, e tramite l'appropriata strutturazione delle varie caratteristiche prestazionali.

Un esempio di come l'analisi di dettaglio delle prestazioni dei componenti di una struttura sia fondamentale per garantirne la funzionalità è dato dagli appoggi strutturali che vincolano l'impalcato di un viadotto. L'appoggio, la cui qualità è garantita dal Produttore, svolge correttamente la sua funzione di vincolo solo se è adeguatamente installato; è compito quindi del Direttore dei lavori e/o del Collaudatore verificare non solo il rispetto di una prescrizione (certificazione del prodotto) ma anche l'ottenimento della prestazione richiesta (corretta installazione sulla base delle specifiche di progetto e delle conseguenti esigenze).

La scomposizione prestazionale risulta sia uno strumento concettuale essenziale per chiarire cosa deve fare una costruzione, sia uno strumento operativo efficace per ordinare i requisiti stessi specificandoli quantitativamente: a tal fine, nella Fig.2, è illustrata schematicamente una simile organizzazione delle prestazioni.

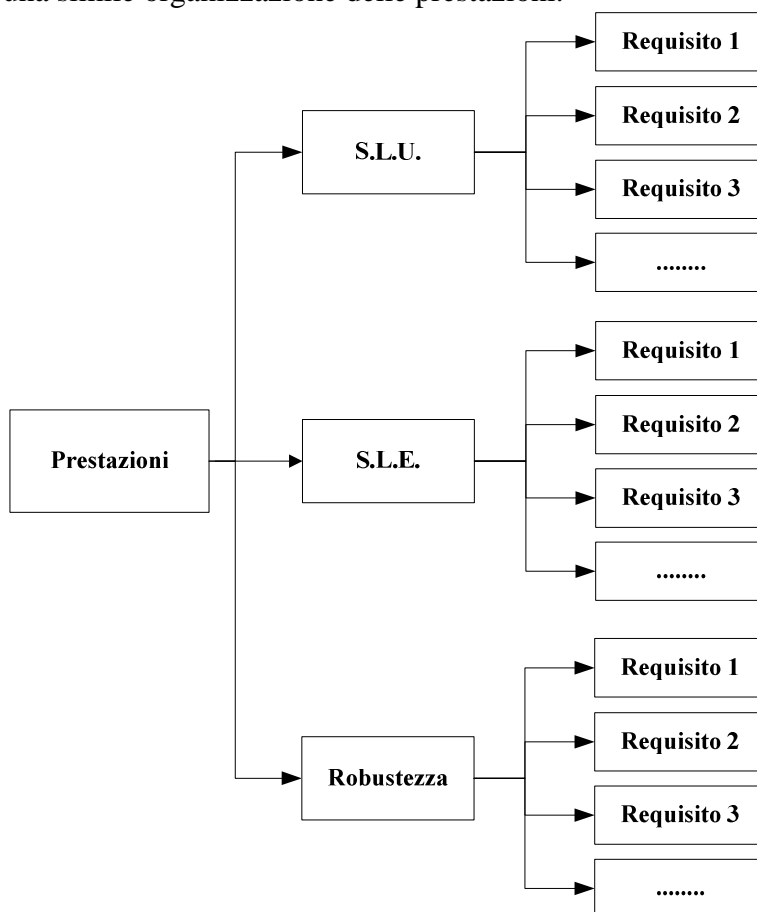


Figura 2: Esempio di scomposizione prestazionale.

Tutte queste informazioni devono essere poste alla base dei Capitolati. In termini generali, le Norme Tecniche delineano l'improrogabile necessità di una modifica profonda degli specifici Capitolati che costituiscono la base per la redazione dei contratti con le Imprese, e che vanno modificati anche per tenere in conto delle vigenti norme armonizzate sui prodotti da costruzione.

Proprio in tale ambito, e con il necessario contributo delle Associazioni di settore e del mondo accademico e professionale, il Servizio Tecnico Centrale curerà la redazione o l'aggiornamento di specifiche Linee Guida che saranno sottoposte al parere del Consiglio Superiore e che potranno costituire un riferimento fondamentale per il mondo delle costruzioni.

LA SCOMPOSIZIONE STRUTTURALE

E' già stato rilevato più volte come un approccio prestazionale alla progettazione strutturale implica una visione sistemica dell'opera, grande o piccola che sia, anche se con le dovute ed ovvie differenziazioni. La scomposizione prestazionale vista nel paragrafo precedente è un esempio tipico del modo di procedere: si scompone il tutto, in quel caso la specificazione delle qualità dell'opera, in sotto parti, fino ad individuare puntualmente le caratteristiche dell'opera stessa.

In questo paragrafo, si evidenzia come lo stesso processo di scomposizione prestazionale riferito alle funzioni ed alle qualità dell'opera, deve essere applicato all'intero organismo strutturale, al fine di evidenziarne le varie parti e la rispettiva dipendenza gerarchica.

Con riferimento alla Fig.3, che considera come esempio un ponte sospeso, la scomposizione consiste, all'interno del sistema globale, nell'identificare delle sottostrutture caratterizzate da diverse funzioni (macro-livello); ognuna di queste sottostrutture, a sua volta, può essere suddivisa nei vari componenti strutturali (meso-livello) e questi ultimi nei singoli elementi costituenti (micro-livello). In questo modo è possibile operare sui singoli livelli, ottimizzando il comportamento di ogni sottosistema al fine di raggiungere i requisiti prestazionali globali richiesti.

La scomposizione prestazionale precedentemente presentata è strettamente correlata alla scomposizione strutturale, infatti, per ogni livello di progettazione sarà necessario considerare delle specifiche prestazioni.

In termini di materiale o componente, questo è un aspetto significativo sia per il Progettista ed il Committente, che per il Produttore. Infatti, le caratteristiche del materiale o del componente devono integrarsi con le specifiche dell'intera opera, per avere una perfetta compatibilità. Questo vale per tutti gli aspetti dell'opera: si pensi ad esempio al fatto di dover prevedere operazioni di manutenzione straordinaria come la sostituzione di dispositivi di appoggio nel caso di ponti od edifici isolati. Inoltre, il comportamento a scale strutturali inferiori, deve essere coerente con quanto previsto nelle specifiche a livello più generale.

La progettazione prestazionale riconosce con questa visione di sistema l'importanza dell'organizzazione gerarchica dell'opera, con reciproche relazioni e vincoli fra le varie parti strutturali. In altri termini, le qualità strutturali sono ritenute dipendenti primariamente e fondamentalmente dall'organizzazione delle varie parti strutturali, che con le loro proprietà elementari, concorrono alle qualità complessive dell'opera. Un'applicazione peculiare di questa visione sistemica si avrà nella individuazione dei requisiti strutturali, quali resistenza e duttilità, dove queste proprietà si definiranno a

livello di materiale, sezione, elemento, ecc... Ed è solo in tale visione che concetti come la gerarchia delle resistenze possono essere utilmente inquadrati, compresi ed applicati.

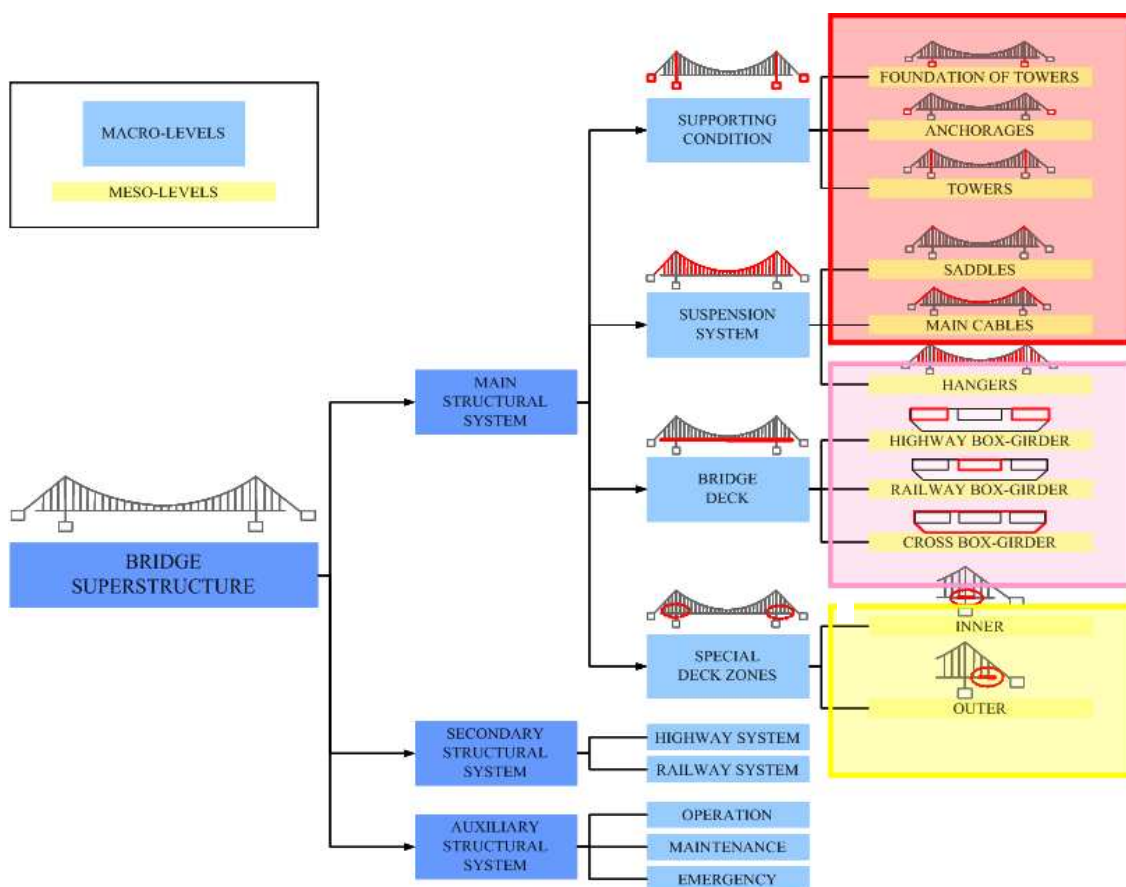


Figura 3: Esempio di scomposizione strutturale: macro-, meso-, micro-livelli.

Con riferimento alla Fig.3, ad esempio, si sono individuate tre differenti sottosistemi strutturali:

- le zone speciali di atterraggio dell'impalcato (vincoli alle estremità dell'impalcato ed in corrispondenza delle torri);
- impalcato vero e proprio;
- sistema di sospensione, composto da cavi principali, torri di sostegno e blocchi di ancoraggio.

In presenza di scenari che presentino azioni sismiche via via di intensità crescenti, ovvero con periodo di ritorno più lunghi, si può accettare di perdere, ovvero di accettare il danneggiamento, prima delle zone a), poi delle zone b), mentre si dichiarano intoccabili le zone c). E' chiaro che queste scelte devono scaturire da un approfondito esame del problema strutturale e da un trasparente processo di negoziazione.

5. IL RUOLO DELL'ANALISI STRUTTURALE

Nella progettazione prestazionale, al processo di modellazione e all'intera analisi

strutturale e' destinato un ruolo centrale: e' lo strumento principale, assieme alla sperimentazione fisica che pero' risulta in genere più onerosa e meno flessibile, per la definizione puntuale del sistema strutturale e l'accertamento delle sue prestazioni.

La Fig.4 evidenzia come la visione sistemica permetta in termini generali di organizzare il processo complessivo di analisi strutturale. La scomposizione strutturale, infatti, focalizza l'attenzione del processo di analisi su scale differenti della costruzione, dall'intero sistema al dettaglio minore. In questo modo, i risultati delle valutazioni ad una scala servono come punto di partenza per le analisi ad una scala successiva, sia inferiore che superiore. Va ricordato che la complessità strutturale risulta significativa quando fenomeni legati ad una scala si trasmettono significativamente ad un'altra. In particolare, la mancanza di robustezza e' evidenziata, quando crisi a scale inferiori passano ignorate ai livelli superiori, facendo emergere collassi catastrofici.

La Fig.4 fa vedere altresì come esista una perfetta omologia tra come si organizza il sistema strutturale e come si descrive o si analizza: e' questa chiarezza di visione che permette di limitare gli errori di concezione o di calcolo che possono innescare collassi.

Nel Capitolo 2 del Testo Unitario sono riportati quelli che devono essere gli obiettivi generali dell'analisi strutturale:

L'analisi strutturale deve sviluppare un'indagine della risposta strutturale alle azioni considerate che permetta valutazioni sia qualitative sia quantitative, tenuto conto delle incertezze presenti nelle:

- a) *differenti assunzioni di base (ipotesi di partenza);*
- b) *diverse modellazioni e diversi parametri fissati per la modellazione delle azioni pertinenti;*
- c) *diverse modellazioni e diversi parametri fissati per la modellazione del sistema strutturale, secondo una strategia che persegua i seguenti due obiettivi generali:*
 - a. *delimitazione degli estremi della risposta strutturale;*
 - b. *individuazione della sensibilità della risposta strutturale.*

Si può quindi parlare di esplorazione della modellazione strutturale al fine di valutare in modo confidente il comportamento strutturale. E' rilevata in particolare che l'analisi strutturale deve determinare i limiti della risposta strutturale e deve definirne le criticità. Queste ultime, cause innescanti le crisi catastrofiche, sono considerate anche all'inizio del Capitolo 3, dove e' affermato:

Allo scopo di evidenziare labilità od instabilità strutturali, ovvero sensibilità nella risposta prestazionale, il Progettista ha l'onere di individuare:

- a) *situazioni che significativamente introducano perturbazioni o imperfezioni dello schema strutturale;*
- b) *disposizioni non simmetriche dei carichi.*

In termini computazionali, entrambi gli obiettivi sono connaturati ad un'impostazione delle analisi nel formalismo della *Logica Fuzzy*. Attraverso questa organizzazione del processo di analisi, infatti, si determinano in modo coerente e completo quali sono i limiti della risposta strutturale e quali sono le priorità. Dal punto di vista strettamente operativo, si ricorda che tale organizzazione di calcolo può essere intesa come un processo di anti-ottimizzazione, che trova la sua naturale implementazione attraverso algoritmi non deterministici, quali quelli genetici. In particolare, come sotto prodotto di tali analisi, si

possono individuare gli scenari più onerosi, gli elementi strutturali critici e le compartimentazioni opportune.

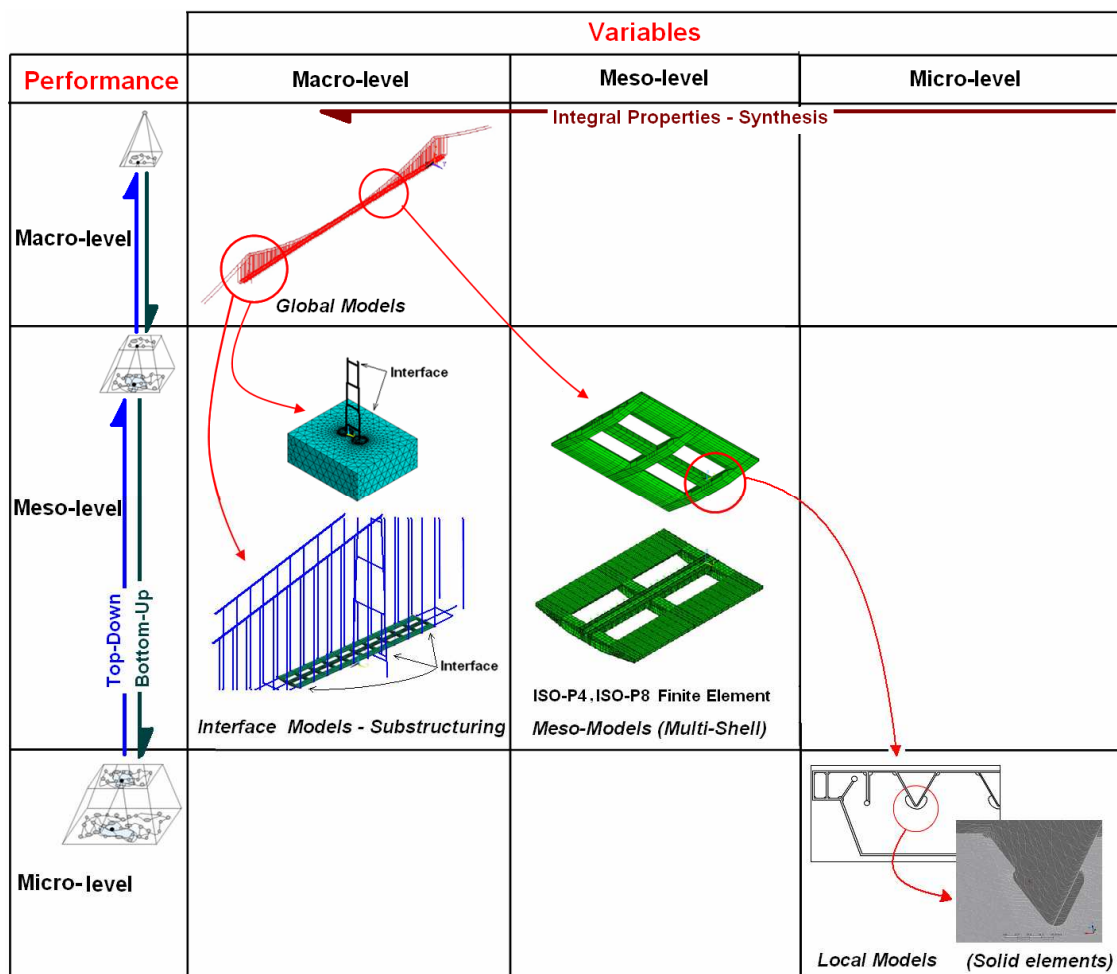


Figura 4: Individuazione gerarchica delle variabili e delle performance strutturali con i relativi livelli di modellazione.

6. REQUISITI STRUTTURALI E CRITERI DI PROGETTO

E' proprio della impostazione prestazionale, e più in generale dell'Ingegneria nella forma più generale, avere alla base pochi principi generali che inquadrano e governano tutte le attività relative alla progettazione ed alla analisi. Questa impostazione è anche, non poteva essere altrimenti, alla base del *Testo Unitario*.

Come detto, questa norma tende principalmente al soddisfacimento, per l'opera, del Requisito Essenziale di "Sicurezza Meccanica e Stabilità", previsto come Requisito Essenziale n.1 dalla Dir. 89/106/CE sui prodotti da costruzione e, quindi, dal DPR 246/93 di recepimento (vedi anche il successivo Cap. 7). Tale requisito richiede che "... l'opera deve essere concepita e costruita in modo da sopportare i carichi prevedibili senza dar luogo a crollo totale o parziale, deformazioni inammissibili, deterioramenti di sue parti o degli impianti fissi, danneggiamenti anche conseguenti ad eventi accidentali ma

comunque prevedibili”.

Il soddisfacimento di tale requisito, importante sia dal punto di vista della sicurezza che della funzionalità dell’opera, si ottiene se le strutture, sia a livello di singolo elemento che di intero sistema, soddisfano determinati requisiti, dei quali nel seguito si ritiene opportuno ricordare brevemente i più significativi.

A livello elementare si possono considerare:

Resistenza: *intesa come la massima reazione (in termini di forze, momenti o sollecitazioni generalizzate) che una data entità strutturale è in grado di opporre al crescere della sollecitazione esterna, prima di giungere al collasso (o ad un predefinito Stato Limite Ultimo).*

L’entità strutturale di cui alla definizione, può essere intesa a vari livelli gerarchici che contribuiscono alla definizione della struttura globale. Pertanto si può parlare di resistenza:

- dei materiali (misurata ad esempio su cubetti di calcestruzzo o su provette di acciaio);
- di sezione (valutata, ad esempio, come momento ultimo di una sezione in cemento armato o acciaio);
- di elemento (ad esempio costituita dal carico ultimo di una trave o di un pilastro);
- di struttura (ad esempio il carico ultimo orizzontale di un telaio, valutato con l’analisi limite).

In generale la resistenza non coincide, essendo in generale maggiore, con il limite elastico (definito come il limite di forza entro il quale si ottengono deformazioni reversibili), pertanto la resistenza ultima si può ottenere a spese di deformazioni irreversibili (danneggiamento).

Duttilità: *intesa come la capacità dell’entità strutturale di offrire un opportuno grado di resistenza oltre il dominio di risposta elastica, ossia in campo plastico, con la mobilitazione di sensibili spostamenti/deformazioni oltre il limite elastico, ottenuti con modesti incrementi di forza.*

E’utile tenere presente che si definisce *grado di duttilità cinematico* μ , il rapporto tra la deformazione generalizzata (spostamento, rotazione, deformazione, scorrimento, ecc.) in condizioni di stato limite ultimo, Δ_u , e la stessa deformazione al limite del comportamento elastico, Δ_{el} : $\mu = \Delta_u / \Delta_{el}$

Anche la duttilità, così come visto per la resistenza, può essere definita a livello *di materiale, di sezione, di elemento e di struttura.*

E’evidente come l’obiettivo della progettazione sia l’ottenimento di un adeguato grado di duttilità di struttura.

La principale garanzia che ci fornisce la duttilità è nei confronti di fenomeni di rottura fragile, che non sono preceduti dal segnale di pericolo costituito da ingenti spostamenti che rendono evidente, non improvviso, il collasso.

Inoltre la duttilità ricopre un ruolo di primaria importanza nei confronti della risposta della struttura ad azioni sismiche e di tutte quelle azioni dinamiche che ne forzano la risposta in campo plastico, poiché strutture duttili in grado di plasticizzarsi sono in grado di limitare queste azioni, a condizione di essere capaci di garantire adeguate deformazioni

plastiche senza collassare per eccesso di deformazione.

Su tale caratteristica è basata l'introduzione in tutte le più moderne normative, e quindi anche nel D.M. 14/09/05 (§3.2.2.5), del fattore di struttura q riduttivo delle azioni sismiche.

La scelta di tale fattore q è demandata al Committente (che deve scegliere consapevolmente la duttilità attesa della sua struttura) di concerto con il Progettista (che detiene le competenze tecniche per illustrarne il significato): il Committente, in particolare, deve essere consapevole ed accettare il danno che sua costruzione esibirà in presenza di un sisma in conseguenza alla scelta di un determinato valore di q . D'altro canto, l'adozione di tale fattore di riduzione dell'azione sismica q investe ora esplicitamente il Progettista della responsabilità di garantire in fase di progetto alla struttura una duttilità almeno pari a quella corrispondente al fattore di riduzione della forza che si intende adottare.

In fase di realizzazione, infine, il Direttore dei lavori avrà il peculiare compito di verificare che la realizzazione dell'opera ed i particolari costruttivi (variabili molto importanti per l'ottenimento della duttilità di progetto) siano correttamente eseguiti.

Si deve, infatti, tenere presente che la realizzazione di un seppur elevato livello di duttilità di materiale, di sezione e di elemento sono condizioni *necessarie ma non sufficienti* all'ottenimento di una sufficiente duttilità di struttura; a questa contribuiscono anche considerazioni legate ai particolari e dettagli costruttivi, ai nodi ed alla distribuzione spaziale degli elementi resistenti. E' a tale scopo, infatti, che molte moderne normative introducono anche il concetto di *gerarchia delle resistenze*, prevista nel D.M. 14/09/05 sia per il progetto in situazioni eccezionali (§4.2.3) sia per azioni sismiche (§5.7.4.1) allo scopo di "... *assicurare alla struttura un comportamento duttile e dissipativo, evitando rotture fragili e la formazione di meccanismi instabili imprevisi*".

Stabilità: nella sua accezione statica, consiste nella *capacità della struttura di tendere a conservare la configurazione di equilibrio dopo aver subito una perturbazione che ne aveva causato l'allontanamento*.

Tale requisito è determinante, ad esempio, nella progettazione di elementi strutturali snelli (quindi particolarmente leggeri) e/o prevalentemente compressi.

Anche la stabilità è un requisito che deve essere raggiunto sia a livello di elemento che di struttura. Di nuovo, la stabilità locale degli elementi che compongono la struttura non garantisce una stabilità globale dell'intero sistema strutturale.

Rigidezza: consiste nella *capacità della struttura di limitare le deformazioni a valori considerati ammissibili* (definiti tenendo conto dell'uso della struttura) *sotto l'azione di carichi "di esercizio"*.

Tale requisito è fondamentale per garantire la funzionalità di una struttura sotto i carichi di esercizio. Sebbene la deformabilità di una struttura, o di una parte di essa, se adeguatamente prevista, non rappresenti di per sé un vero e proprio rischio nei confronti del collasso strutturale (S.L.U.), le deformazioni eccessive di determinate parti della struttura potrebbero renderla inservibile, facendo quindi raggiungere uno Stato Limite di Esercizio.

Limitando l'ampiezza delle deformazioni sotto i carichi di esercizio inoltre, una

limitata deformabilità agisce positivamente nei confronti dei fenomeni di fatica e di instabilità.

Va sottolineato, a tale proposito, che nel D.M. spesso è sottinteso che il concetto di limitazione della deformabilità in condizioni di esercizio condiziona pesantemente il dimensionamento dell'opera. Un esempio in tal senso è nel Capitolo 7 (Geotecnica) dove per le fondazioni superficiali – ad esempio plinti di fondazione – la verifica dei cedimenti risulta generalmente più gravosa della verifica a rottura. Non deve stupire, quindi, che in alcuni casi la norma presenti dei coefficienti di sicurezza minori dei precedenti Decreti quando si effettua la verifica a rottura.

In definitiva non si può più prescindere dalla verifica in esercizio e dall'analisi della compatibilità con le prestazioni previste per l'opera.

A livello di sistema strutturale si possono inoltre considerare i seguenti requisiti.

Robustezza: come già anticipato nella precedente introduzione logica al D.M. 14/09/05, la Robustezza Strutturale consiste nella *capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti, quali possibili eventi eccezionali come incendio, esplosioni, urti o conseguenze di errori umani.*

Per evento eccezionale può intendersi sia uno scenario di progetto più gravoso di quanto ipotizzato in fase di progettazione, sia il verificarsi di scenari non previsti o non prevedibili in tale fase, sia conseguenze di errori umani, commessi in qualunque stadio della vita della struttura.

E' da sottolineare che il termine "robustezza strutturale", citato anche nella definizione del Requisito Essenziale 1 della Dir.89/106/CE sui prodotti da costruzione, non deve essere inteso come sinonimo di invulnerabilità della struttura. La definizione di robustezza recita che la struttura non deve essere danneggiata "in maniera sproporzionata alla causa di origine".

Una struttura non dotata di adeguata robustezza strutturale può subire, in caso di eventi eccezionali, un collasso progressivo caratterizzato dalla perdita di capacità portante di una porzione relativamente piccola della struttura, che determina il collasso di un'altra porzione di struttura fino ad estendersi così con un effetto domino a gran parte o a tutta la struttura stessa.

In una progettazione globale il requisito di robustezza può essere valutato verificando ad esempio che la rimozione di un singolo elemento, di una parte limitata della struttura, o l'insorgenza di un accettabile livello di danno locale si risolva al più in un collasso localizzato, ristretto ai piani immediatamente inferiori e superiori a quello in cui si è presentato il danno originario. Si devono, in altre parole, garantire percorsi di carico alternativi, ed in quest'ottica, un opportuno grado di duttilità, iperstaticità e ridondanza diffuso su tutta la struttura può costituire una garanzia di un buon grado di robustezza strutturale.

Anche la robustezza, come la duttilità, per essere conseguita a livello globale, ha bisogno di una particolare cura di dettagli costruttivi sia in fase di progettazione che di realizzazione.

Durabilità: consiste nella *capacità che una struttura ha di mantenere invariato, al trascorrere del tempo o dell'utilizzo, il margine di sicurezza nei*

confronti degli stati limite considerati in fase di progetto, nell'ipotesi che venga posto in opera il previsto piano di manutenzione.

La durabilità, definita come conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, è una proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza siano garantiti durante tutta la vita utile di progetto dell'opera. La durabilità è funzione dell'ambiente in cui la struttura vive e del numero di cicli di carico cui la struttura potrà essere sottoposta. La durabilità si ottiene utilizzando materiali di ridotto degrado ovvero assegnando dimensioni strutturali maggiorate necessarie a compensare il deterioramento prevedibile dei materiali durante la vita utile di progetto, oppure mediante procedure di manutenzione programmata.

Durante l'esercizio della struttura, ci si deve attendere una riduzione del margine di sicurezza nei confronti degli stati limite di progetto, anche solo per il fisiologico invecchiamento della struttura stessa e dei materiali che la compongono. A questa causa "naturale", se ne possono aggiungere delle altre connesse più o meno direttamente con azioni dell'uomo, quali: mancanza di cura nella progettazione o esecuzione di particolari del progetto originario, mancanza di conoscenze specifiche nei confronti dei materiali impiegati (specie se di nuova concezione), uso improprio della struttura, uso della struttura oltre la sua vita utile, intervento di nuovi ed inattesi scenari non prevedibili in fase di progetto, mancata progettazione o esecuzione dei piani di manutenzione della struttura.

Il D.M. 14/09/05 considera in maniera determinante e spesso esplicita (in questo senso in maniera del tutto innovativa rispetto al panorama normativo previgente) l'aspetto della durabilità delle opere, in particolare, ma non solo, nel trattare i materiali (ad esempio per il calcestruzzo armato, § 11.1.11).

In questo senso conferisce esplicite responsabilità alle figure coinvolte nel processo, ed in particolare:

- al Progettista, che è tenuto a selezionare i materiali ed a progettare l'opera in modo da garantirne la durabilità per l'intera vita utile; lo stesso Progettista è tenuto, inoltre, a predisporre il fondamentale documento costituito dal piano di manutenzione che detta le modalità per il mantenimento della durabilità durante l'esercizio della struttura;
- al Collaudatore, che è tenuto ad esaminare e recepire il piano di manutenzione (§8.1);
- al Gestore dell'opera, che è tenuto a rispettare ed eseguire quanto prescritto nel suddetto piano di manutenzione.

L'ottenimento puntuale dei citati requisiti appare fondamentale nella progettazione e realizzazione delle costruzioni, e può essere perseguito adottando una serie di "criteri generali di progettazione"; in alcuni casi è la norma stessa, come ad esempio nel caso di progettazione in presenza di azioni sismiche (D.M. 14/09/05 §5.7.4.1) a proporre alcuni:

Gli edifici devono avere quanto più possibile una distribuzione degli elementi strutturali con caratteristiche di semplicità, simmetria, iperstaticità, regolarità in pianta e in altezza e variazione graduale delle caratteristiche geometriche e di rigidità in altezza.

Fra questi criteri appare opportuno citarne ed illustrarne brevemente alcuni.

Semplicità

Il criterio più generale di progetto riguarda la semplicità: per l'Ingegneria questo è un valore fondamentale, perchè crea i fondamenti per la certezza di comportamento. Questo principio diventa quindi una strategia globale per non introdurre ulteriori complessità in un ambiente già di per se altamente incerto.

**Regolarità
geometrica,
simmetria e
modularità**

La regolarità geometrica riguarda la disposizione plano-altimetrica della struttura; riguarda quindi l'individuazione di una configurazione geometrica chiara, lineare, con limitate eccentricità e variazioni brusche di masse o rigidezze, con possibili simmetrie e ripetizioni o modularità. Questo è un criterio che riguarda tutte le scale strutturali, dai componenti all'intera struttura: si pensi alle connessioni delle aste nelle strutture reticolari o alla disposizione di un intero edificio nei riguardi di una migliore risposta all'azione sismica. La modularità riguarda invece come la struttura e' suddivisa, e quindi naturalmente compartimentata.

**Iperstaticità
e ridondanza**

La ridondanza strutturale consiste nel prevedere la duplicazione dei percorsi e meccanismi resistenti, ponendoli in parallelo, in modo da assicurare la sicurezza globale dell'opera anche in caso di crisi da parte di un sistema resistente, per mezzo della redistribuzione dei percorsi di carico. A questa si accosta il concetto di iperstaticità, che consiste nel progettare strutture con vincoli ed interconnessioni sovrabbondanti rispetto alla quantità strettamente necessaria. Entrambi i criteri assumono un importante ruolo nell'ottenimento dei requisiti di resistenza, duttilità e robustezza strutturale.

**Prevedibilità
nel tempo**

Riguarda la necessità di utilizzare materiali, componenti o soluzioni il cui comportamento sia il più possibile prevedibile. Anche in questo caso, alterazioni brusche ed imprevedibili dei comportamenti meccanici di materiali e componenti, che si ripercuotano sulla risposta strutturale complessiva, non possono essere accettabili.

**Principio di
precauzione**

In questo contesto il criterio si rivolge alla scelta dei materiali e prodotti strutturali da usare nelle opere affinché si possa garantire il rispetto dei requisiti sopra indicati. In particolare il criterio è riferito ai materiali e prodotti non esplicitamente citati nella norma (vedi D.M. 14/09/05, §5.5 "*Costruzioni in altri materiali*"), ad esempio perché innovativi, e richiede, in generale, che tali materiali possano essere impiegati solo se il Produttore ne garantisce prestazioni in linea con quanto richiesto dalla norma stessa.

In termini generali, si può affermare che per poter essere utilizzato ai fini strutturali, un materiale o un componente devono avere caratteristiche geometriche, chimiche, fisiche e meccaniche e, nel senso più ampio, comportamenti certi. Questo requisito basilare, può essere esplicitato attraverso i seguenti punti:

- 1) il materiale/componente deve avere caratteristiche/comportamenti prevedibili, ovvero
 - a. devono presentare una caratterizzazione statistica ragionevolmente poco dispersa, presentando coefficienti di variazione adeguatamente limitato;
 - b. devono restare costanti nel tempo, ovvero il materiale/componente deve essere durevole;
 - c. devono essere grandemente inalterabili se il materiale/componente è sottoposto a previsti variazioni (termiche, igrometriche,...) dell'ambiente, anche protratte nel tempo, in cui il materiale /componente è posto;
 - d. devono presentare degrado proporzionale all'intensità di perturbazioni causate dall'ambiente in cui il componente/materiale è posto (robustezza rispetto ad agenti esogeni);
 - e. fragilità specifiche devono essere definite e possibilmente evitate;
- 2) il materiale/componente deve essere riproducibile con ragionevole facilità, ovvero:
 - a. deve essere producibile con difettosità opportunamente limitata;
 - b. deve avere caratteristiche/comportamento poco sensibile alle imperfezioni (robustezza intrinseca);
 - c. deve presentare caratteristiche/comportamento poco sensibile ad alterazioni del processo produttivo, ovvero presentare degrado di proprietà proporzionale a tali alterazioni (robustezza di produzione).

A conclusione di questo paragrafo, va rilevata l'importanza che tale principio, all'interno del quadro prestazionale complessivo del *Testo Unitario*, significa per l'introduzione di nuovi materiali e componenti per uso strutturale. L'innovazione tecnologica è assolutamente agevolata, a patto che sia supportata da considerazioni teoriche e indagini sperimentali accurate, in accordo con quanto stabilito in particolare nella parte 5.5 e nel Capitolo 11 del *Testo Unitario*. A proposito della sperimentazione, è essenziale la coerenza delle modalità di prova con le condizioni di utilizzo del materiale/componente nell'opera reale.

RINGRAZIAMENTI

Il presente contributo presenta anche risultati del Contratto di Ricerca Scientifica fra l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" e la Società TECNOPIEMONTE s.r.l., Romagnano Sesia (NOVARA). Si ringraziano per i contributi e le innumerevoli discussioni gli Ingg. Piero Baraton, Emanuele Renzi, Marco Battaini, Luca Gemma, Giulia Righetti, Francesco Petrini, Stefania Arangio.

BIBLIOGRAFIA

[1] Decreto Ministeriale 14 settembre 2005, Norme Tecniche per le Costruzioni, Supplemento Ordinario n.159 della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 23 settembre 2005.

[2] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Adunanza del 30 marzo 2005, Parere sul Testo Unico per la Normativa Tecnica delle Costruzioni.