

3.2 Principi di progetto e di calcolo delle costruzioni

I principi generali di progetto e di calcolo delle costruzioni sono formulati nell'Eurocodice 0 "Criteri generali di progettazione strutturale".

3.2.1 Stile degli Eurocodici

Tutti gli Eurocodici utilizzano un metodo di verifica chiamato calcolo agli stati limite (cfr. *infra* cap. 4). L'Eurocodice 0 descrive i requisiti da rispettare per conferire alle costruzioni progettate un livello di affidabilità appropriato, supponendo che le costruzioni siano oggetto di controllo di qualità a tutti gli stadi: progetto, esecuzione, esercizio e manutenzione (cfr. EN 1990, 2.1).

Gli Eurocodici sono redatti stabilendo una distinzione tra principi e regole di applicazione (cfr. EN 1990, 1.4). I principi, identificati da una lettera P che segue il numero del paragrafo, comprendono:

- formulazioni di ordine generale e definizioni per le quali non c'è alternativa;
- prescrizioni e modelli analitici per i quali non si permette alternativa a meno che non venga specificatamente stabilita.

Le regole applicative sono generalmente regole riconosciute che derivano dai principi e soddisfano le loro richieste. È lecito usare regole alternative a quelle applicative date dagli Eurocodici, a condizione che si controlli che tali regole alternative siano in accordo con i principi principali e abbiano la stessa affidabilità.

Questa disposizione, che sembra dare una grande flessibilità di impiego agli Eurocodici, è particolarmente delicata. In effetti la prova di equivalenza tra due regole diverse per dimostrarne il pari livello di affidabilità suppone, nei casi più semplici, un doppio calcolo, difficilmente svolto in maniera sistematica.

La regola precedente è completata dalla nota seguente (1.4(5), nota):

Se una regola applicativa è sostituita da una regola di calcolo diversa, il dimensionamento risultante non può essere dichiarato pienamente conforme all'EN 1990, anche se il dimensionamento soddisfa i principi dell'EN 1990. Nel caso si utilizzi l'EN 1990 in relazione a una proprietà dell'allegato Z di una scheda prodotto o in una guida per accordi tecnici europei, l'utilizzo di una regola di calcolo diversa può non essere accettata per una marcatura CE.

Questo per limitare fortemente le velleità di deroga agli Eurocodici negli Stati dell'Unione Europea.

3.2.2 Affidabilità strutturale

La sezione 1 "Generalità" dell'Eurocodice 0 fissa un certo numero di definizioni largamente ispirate alla norma ISO 3898. Per il momento si assume come definizione di affidabilità quella riferita alle esigenze delle costruzioni:

Capacità di una struttura o di un elemento strutturale di soddisfare i requisiti specificati, compresa la durata di esercizio, per la quale sia stata concepita/o. L'affidabilità si esprime normalmente in termini di probabilità.

Quindi l'affidabilità strutturale è un concetto molto generale che copre diversi aspetti legati ai fenomeni e alle situazioni che si vogliono evitare o di fronte ai quali ci si vuole premunire:

- la sicurezza strutturale (*structural safety*);
- la funzionalità (*serviceability*), sia in fase di progetto che in fase di costruzione;
- la tenuta relativamente all'integrità fisico chimica, soggetta alle influenze ambientali;
- la robustezza associata a rischi di rottura o di instabilità e a situazioni accidentali, siano esse previste o meno.

3.2.3 Requisiti delle costruzioni

I requisiti delle costruzioni hanno l'aspetto dei requisiti per la qualità (sezione 2). Sono la traduzione, dal punto di vista dell'affidabilità strutturale, di una politica di gestione dei rischi che interessa principalmente le autorità pubbliche incaricate alla sicurezza dei beni e delle persone quanto al buon funzionamento di un Paese o di una zona amministrativa sul piano economico e sociale. Sono precisati sotto forma di criteri qualitativi o quantitativi, per esempio un valore di spostamento, di deformazione, di sforzo che si cerca di impedire che venga raggiunto nel corso di un secolo, sia da non superare più di un certo numero di volte in un anno o durante una certa frazione di durata di vita attesa.

I requisiti sono quindi definiti da due principi generali:

2.1(1)P – *Una struttura deve essere concepita e realizzata in modo che nell'arco della durata di vita attesa, con appropriati livelli di affidabilità e in maniera economica:*

– *resista a qualsiasi azione e influenza che possano intervenire durante la sua esecuzione e il suo utilizzo;*

– *permanga nell'uso per il quale è stata concepita.*

2.1(4)P – *Una struttura deve essere concepita e costruita in modo che non sia sottoposta a danni causati da avvenimenti come esplosioni, urti e conseguenze di errori umani in maniera sproporzionata in rapporto alla causa iniziale.*

Direttamente ispirato alla direttiva 89/106/CEE, quest'ultimo principio è molto severo di fronte alle responsabilità del progettista in caso di catastrofe provocata da un incidente minore. Ovviamente una nota precisa che gli avvenimenti e gli incidenti da prendere in considerazione sono quelli che, per un singolo progetto, siano stati definiti in accordo con il cliente o con l'autorità in questione.

3.2.4 Gestione dell'affidabilità

L'Eurocodice 0 (2.2) indica la possibilità di differenziare l'affidabilità a seconda che si consideri la sicurezza strutturale o l'attitudine al servizio e in funzione della causa e/o del modo in cui può avvenire il cedimento, delle conseguenze possibili del cedimento in termini di rischi per la vita umana, dei danni, delle potenziali perdite economiche, della pressione dell'opinione pubblica, delle spese e delle disposizioni necessarie per ridurre il rischio di cedimento. Lo scopo della differenziazione dell'affidabilità è un'ottimizzazione socioeconomica delle risorse utilizzate per la costruzione delle opere tenendo conto delle conseguenze prevedibili dei cedimenti e del costo delle costruzioni.

Tuttavia bisogna distinguere tra concetti di differenziazione di affidabilità e di gestione di affidabilità con l'aiuto delle misure appropriate. Per esempio si può immaginare una riduzione (moderata) di alcuni coefficienti parziali, compensata da un miglioramento del controllo della qualità del progetto o dell'esecuzione.

Si può pervenire a una differenziazione di affidabilità attraverso una combinazione appropriata di misure:

- preventive o di protezione, per esempio di fronte a rischi di incendio;
- relative al caso di affidabilità, per esempio giocando sui valori rappresentativi delle azioni e sui coefficienti parziali (cfr. *infra* cap. 4);
- relative alla gestione della qualità con lo scopo di ridurre gli errori di progetto e di esecuzione (compresi i gravi errori umani);
- altre misure specifiche prese al momento del progetto;
- misure destinate ad assicurare un'esecuzione di qualità e manutenzione efficace.

Alcuni sviluppi innovativi sono stati introdotti nell'allegato B (informativo) dell'Eurocodice 0 e che troveranno applicazione negli allegati nazionali. Senza entrare nei dettagli di questo allegato, indichiamo semplicemente l'introduzione di un sistema di tre classi di conseguenze (chiamate da CC1 a CC3) in caso di cedimento strutturale: la maggior parte delle costruzioni è classificata nella classe intermedia (CC2) descritta come conseguenza media in termini di perdita di vite umane, conseguenze economiche, sociali o atmosferiche importanti.

Questo permette:

- di definire il livello di affidabilità "standard" ottenuto applicando i metodi e valori numerici raccomandati dagli Eurocodici;
- di introdurre la possibilità di definire livelli di requisiti superiori o inferiori.

Il modo in cui si considerano le conseguenze in caso di cedimento è un elemento di estrema importanza nella progettazione di opere in zona sismica (cfr. *infra* cap. 12).

3.2.5 Vita utile di progetto

L'Eurocodice 0 (2.3) introduce la nozione di vita utile di progetto (*design working life*), cioè l'intervallo di tempo durante il quale una struttura, o una parte di essa, deve poter

essere utilizzata come previsto, essendo oggetto di manutenzione programmata ma senza che sia necessario effettuare grandi riparazioni.

Per ogni opera particolare la vita utile di progetto deve essere esplicitamente definita nelle specifiche di progetto se la costruzione non rientra in una delle categorie per le quali essa è definita a livello nazionale. Vengono proposti alcuni valori indicativi:

- 10 anni per strutture temporanee;
- da 10 a 25 anni per parti strutturali sostituibili per esempio travi carroponete, apparecchi di appoggio;
- da 15 a 30 anni per strutture agricole e similari;
- 50 anni per strutture di edifici e altre strutture comuni;
- 100 anni per strutture di edifici monumentali, ponti e altre strutture di ingegneria civile.

Nella medesima costruzione, gli elementi strutturali non hanno necessariamente la stessa vita utile di progetto. Il valore numerico della vita utile di progetto interviene direttamente nei calcoli di resistenza a fatica (ponti e strutture miste o in metallo, cavi ecc.) o di corrosione (pali metallici in ambiente aggressivo, suolo armato ecc.). Questa nozione è direttamente legata a quella di durabilità.

Se un professionista è portato a prevedere una vita utile di progetto superiore a quella descritta dagli ordini di grandezza precedentemente citati, egli dovrà analizzare il ruolo che possono giocare sulla longevità dell'opera fattori quali:

- l'utilizzo dell'opera;
- gli agenti fisico chimici che hanno influenza sulla struttura;
- le forme della struttura;
- l'assicurazione di una manutenzione regolare.

Inoltre bisognerà prendere tutte le misure di rinforzo appropriate operando su:

- disposizioni costruttive;
- protezione della struttura da pericoli potenziali;
- composizione, proprietà e caratteristiche dei materiali;
- qualità della manodopera;
- livello di controllo a tutti gli stadi, dal progetto all'esecuzione;
- qualità.

3.2.6 Durabilità

Con durabilità s'intendono le misure destinate a prevenire il degrado nel tempo dei materiali costituenti la struttura. L'attitudine di una struttura a resistere alle prove del tempo durante la propria esistenza è legata a problematiche per le quali le teorie probabilistiche di affidabilità e le norme che ne derivano non sono ancora capaci, le prime di proporre ipotesi precise, le seconde di enunciare specifiche esplicite sulla vita utile dell'opera.

L'Eurocodice 0 al punto 2.4(1)P enuncia il seguente principio:

La struttura dovrà essere progettata in modo tale che il suo degrado nell'arco della sua vita utile di progetto non ne limiti le prestazioni a livelli inferiori a quelli previsti, tenuto conto delle condizioni di esercizio e del livello di manutenzione atteso.

Questo principio è molto rigido. Tuttavia il mercato delle grandi opere specifica sempre più frequentemente esigenze quantificate di durabilità: per esempio, nel caso del ponte Vasco da Gama a Lisbona, fu specificato un valore limite di concentrazione di cloruro al livello delle armature (0,4% del peso del cemento) nell'arco di 120 anni e anche il viadotto di Millau fu concepito e realizzato costruito con un obiettivo di durabilità (riguardante principalmente travi in calcestruzzo) di 120 anni. Bisogna dunque considerare l'influenza dell'ambiente fin dalla fase di progetto per determinarne l'incidenza sulla durabilità e poter adottare opportuni accorgimenti che permettano di assicurare la protezione dei materiali e dei prodotti. Il livello di degrado prevedibile (dovuto per esempio all'alterazione dei materiali) può essere stimato sulla base di calcoli, di prove, dell'esperienza derivante da costruzioni precedenti, o da una combinazione di questi tre metodi.

3.2.7 Gestione della qualità

L'Eurocodice 0 (2.5) fa cenno a più riprese alle questioni di gestione della qualità. L'applicazione degli Eurocodici suppone che vengano adottate misure appropriate per ottenere una struttura corrispondente ai requisiti e alle ipotesi ammesse nei calcoli. Queste misure comprendono la definizione dei requisiti in materia di affidabilità, dei metodi di organizzazione e dei controlli ai diversi stadi del progetto, dell'esecuzione, dell'utilizzo e della manutenzione.

Il percorso di qualità è volto principalmente a evitare errori di origine umana e a intervenire in tempo utile in caso di eventuali circostanze impreviste. Altri obiettivi possibili sono la soddisfazione di alcune aspirazioni del professionista, per esempio ricercare un miglioramento della durabilità a lungo termine. In generale il percorso di qualità implica che:

- siano identificati i fattori che intervengono nell'ottenimento della qualità della costruzione da realizzare;
- questi fattori siano sottoposti al controllo del management dell'impresa incaricata di realizzare la costruzione;
- se necessario siano aggiunte ulteriori assicurazioni sulla conformità della costruzione considerata ai requisiti specificati.

Quando questo percorso è conforme alle specifiche delle norme europee della serie 29000 (o ISO della serie 9000), viene definito "controllo qualità"; la sua messa in pratica implica:

- la definizione di un Piano (di Garanzia) della Qualità;

- la gestione di questo PQ attraverso una gestione della qualità (cfr. ISO 8402-3.2) integrata nell'impresa incaricata di realizzare la costruzione;
- eventualmente, il rispetto delle procedure nella produzione di documenti di assicurazione di qualità (cfr. EN 29004-17.2).

Nel futuro prossimo, verrà sistematicamente fatto appello a programmi di calcolo per l'applicazione degli Eurocodici: il PQ dovrà assicurare la validazione dei programmi di calcolo, il loro adeguamento alle diverse fattispecie così come la validità dei dati forniti in ingresso ai programmi.

3.3 Progettare edifici con gli Eurocodici

In generale, il dimensionamento di qualsiasi costruzione prevede un certo numero di tappe, secondo un processo spesso interattivo successivo a una riflessione preliminare sugli scenari di pericolo potenziali. La definizione del livello di prestazioni previsto in fase iniziale (progetto funzionale e architettonico) prevede:

- la valutazione delle azioni e delle influenze ambientali;
- la determinazione degli effetti delle azioni di origine ambientale;
- il dimensionamento degli elementi strutturali in funzione dei materiali scelti e delle loro proprietà.

La determinazione delle azioni e delle influenze dell'ambiente si basa principalmente su:

- l'Eurocodice 1: carichi di esercizio, azioni in caso di incendio, azioni climatiche, azioni in corso di esecuzione e azioni accidentali (cfr. *infra* cap. 5);
- l'Eurocodice 7: azioni geotecniche (cfr. *infra* cap. 11);
- l'Eurocodice 8: azioni sismiche (cfr. *infra* cap. 12).

Alcune azioni legate al comportamento dei materiali (per esempio dovute al ritiro del calcestruzzo) sono valutate con l'aiuto degli Eurocodici di riferimento.

La resistenza al fuoco è un'esigenza particolarmente importante in tutte le strutture. Gli Eurocodici contengono una parte 1-2 che tratta il comportamento delle strutture in caso di incendio, le azioni dovute al fuoco propriamente dette sono definite nella parte 1-2 dell'Eurocodice 1. Si veda la figura 3.1. Il paragrafo seguente offre un'indicazione più precisa di alcuni casi particolari.

La tabella 3.1 riassume l'insieme dei testi ai quali si può dover fare riferimento per redigere un progetto di edificio.

Per alcuni edifici industriali, si può fare riferimento alla parte 3 dell'Eurocodice 1 "Carichi da traffico sui ponti" (cfr. *infra* cap. 5).

Tabella 3.1. Progettazione degli edifici con gli eurocodici

Eurocodice	Parte dell'Eurocodice	Titolo e/o oggetto
EN 1990 Eurocodice strutturale Base di calcolo delle strutture (Cfr. <i>infra</i> Cap. IV)	Testo principale	Esigenze fondamentali. Principi di calcolo agli stati limite per il metodo dei coefficienti parziali
	Allegato A1	Applicazione agli edifici (azioni combinate)
EN 1991: Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture (Cfr. <i>infra</i> Cap. V)	Parte 1-1	Pesi per unità di volume, pesi propri e sovraccarichi per gli edifici
	Parte 1-2	Azioni in generale – Azioni sulle strutture esposte al fuoco
	Parte 1-3	Azioni in generale – Carichi da neve
	Parte 1-4	Azioni in generale – Azioni del vento
	Parte 1-5	Azioni in generale – Azioni termiche
	Parte 1-6	Azioni in generale – Azioni durante la costruzione
	Parte 1-7	Azioni sulle strutture – Azioni eccezionali
EN 1992: Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo	Parte 1-1	Regole generali e regole per gli edifici
	Parte 1-2	Progettazione strutturale contro l'incendio
EN 1993: Eurocodice 3 – Progettazione delle strutture di acciaio	Parte 1-1	Regole generali e regole per gli edifici
	Parte 1-2	Progettazione strutturale contro l'incendio
	Parte 1-3	Regole supplementari per l'impiego dei profilati e delle lamiere sottili piegati a freddo
	Parte 1-4	Regole supplementari per acciai inossidabili
	Parte 1-5	Elementi strutturali a lastra
	Parte 1-6	Regole supplementari per le strutture a guscio
	Parte 1-7	Regole supplementari per lastre ortotrope caricate al di fuori del loro piano
	Parte 1-8	Progettazione dei collegamenti
	Parte 1-9	Fatica
	Parte 1-10	Resilienza del materiale e proprietà attraverso lo spessore
	Parte 1-11	Progettazione di strutture con elementi tesi

Eurocodice	Parte dell'Eurocodice	Titolo e/o oggetto
EN 1994: Eurocodice 4 – Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo	Parte 1-1	Regole generali e regole per gli edifici
	Parte 1-2	Progettazione strutturale contro l'incendio
EN 1995: Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno	Parte 1-1	Regole comuni e regole per gli edifici
	Parte 1-2	Progettazione strutturale contro l'incendio
EN 1996: Eurocodice 6 – Progettazione delle strutture di muratura	Parte 1-1	Regole generali per strutture di muratura armata e non armata
	Parte 1-2	Progettazione strutturale contro l'incendio
	Parte 2	Considerazioni progettuali, selezione dei materiali ed esecuzione delle murature
	Parte 3	Metodi di calcolo semplificato per strutture di muratura non armata
EN 1997: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica	Parte 1	Calcoli di fondazione
EN 1998: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica	Parte 1	Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
	Parte 5	Fondazioni, strutture di contenimento e aspetti geotecnici

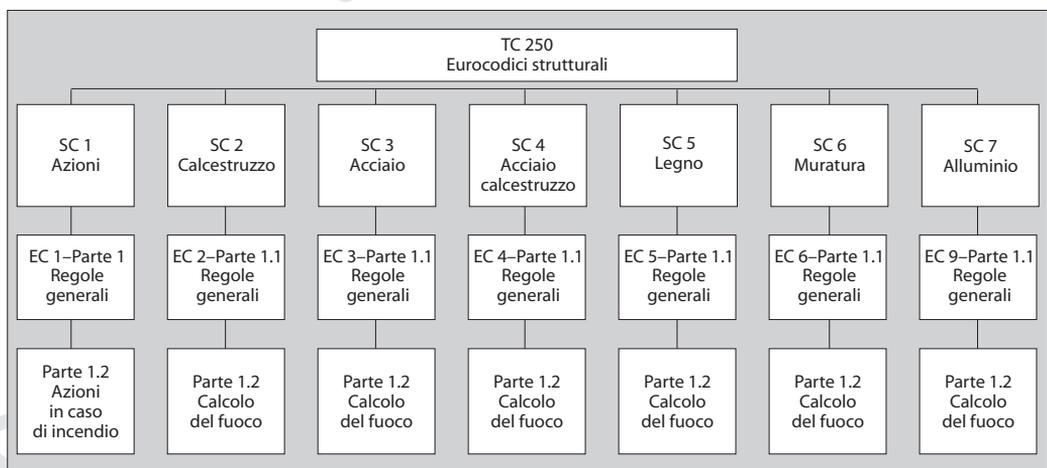


Figura 3.1 Organizzazione dei documenti sul calcolo del fuoco nelle condizioni inserite nella tab. 3.1.

3.4 Caso particolare del comportamento in caso di incendio degli edifici

Ciascuna parte degli Eurocodici che tratta il problema “incendi” contiene capitoli che trattano i seguenti argomenti:

- 1 generalità;
- 2 principi di base;
- 3 proprietà dei materiali ad alte temperature;
- 4 metodi di verifica di resistenza all’incendio delle strutture;
- 5 disposizioni costruttive;

così come anche qualche allegato contiene precisazioni sulle proprietà dei materiali o sui metodi di verifica.

I principi di base menzionano tre possibili livelli di schematizzazione delle strutture per verificarne il comportamento in caso di incendio. Essi sono:

- l’analisi globale della struttura in caso di incendio generalizzato o localizzato, che permette di prendere in considerazione le interazioni tra gli elementi costitutivi della struttura (fig. 3.2);
- l’analisi di una parte della struttura (portale, insieme di elementi), che permette di determinare le condizioni agli stati limite della sottostruttura studiata, considerate come costanti durante tutta la durata dell’incendio (fig. 3.3);
- l’analisi per elementi costitutivi della struttura (pilastri, travi, solaio ecc.), condotta trascurando qualsiasi evoluzione in funzione nel tempo dell’interazione con tutti gli altri elementi (fig. 3.4).

In linea generale, la determinazione della resistenza al fuoco di una struttura rispetto a esigenze regolamentari (dunque formulate implicitamente con riferimento all’incendio convenzionale) è condotta partendo dai singoli elementi costitutivi: pilastro, palo, solaio ecc. Il ricorso all’analisi globale o per parti, che necessita l’utilizzo di metodi di calcolo avanzati, è raccomandata soltanto per strutture complesse o in caso di riferimento a scenari di incendio a sviluppo “reale”.

Per la verifica della resistenza al fuoco di elementi da costruzione o di una struttura, si suppone che la funzione portante sia assicurata per un tempo di esposizione al fuoco assegnato, se la disequazione seguente è rispettata:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

dove:

$E_{fi,d}$: valore di calcolo dell’effetto delle azioni nella situazione di incendio di calcolo, secondo la parte 1-2 dell’Eurocodice 1;

$R_{fi,d,t}$: resistenza di calcolo corrispondente dell’elemento o della struttura, in situazione di incendio di calcolo, al tempo t .

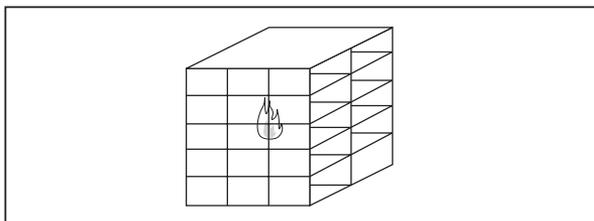


Figura 3.2 Analisi globale.

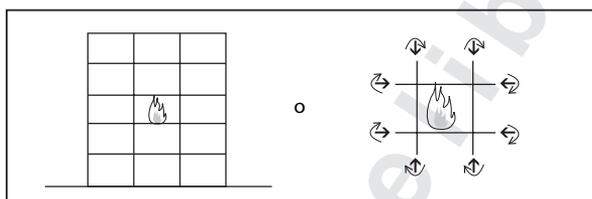


Figura 3.3 Analisi per sottoinsiemi.

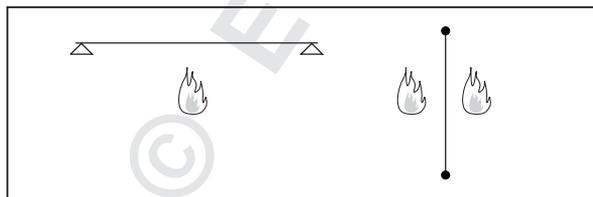


Figura 3.4 Analisi per singoli elementi.

Questa verifica può essere effettuata tramite tre approcci diversi:

- riferendosi a tabelle di valori assegnati in ogni Eurocodice; tuttavia questi valori valgono soltanto in caso di incendio convenzionale;
- utilizzando i metodi semplificati che fanno riferimento a formule analitiche; tuttavia questi metodi semplificati sono limitati agli elementi costitutivi (pilastri, travi, solai ecc.);
- attraverso modelli di calcolo detti avanzati, che permettono una stima più precisa e globale del comportamento delle strutture in caso di incendio, ma che necessitano il ricorso a simulazioni numeriche e sono generalmente basati sul metodo degli elementi finiti. In ogni caso il ricorso a questi modelli è regolamentato.¹

¹ Cfr. capitolo 4 degli Eurocodici.