

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale
e Norme Tecniche per le Costruzioni

Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.

1 - Problematiche generali: modalità di collasso,
tipo di analisi, valori della resistenza

Imola
16-18 maggio 2013
Aurelio Ghersi

Normativa di riferimento: norme italiane

Criteri generali per la progettazione sismica:

- D.M. 14/1/2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 08)
 - Cap. 3, par. 3.2: Azione sismica
 - Cap. 7: Progettazione per azioni sismiche

Indicazioni specifiche per edifici esistenti:

- NTC 08 - Cap. 8: Costruzioni esistenti
- Circolare 2/2/09 - Cap. C8: Costruzioni esistenti
- OPCM 3431
ove non in contrasto con le Norme Tecniche per le Costruzioni
 - Cap. 11: Edifici esistenti

Normativa di riferimento: norme europee

Criteri generali per la progettazione sismica:

- Eurocodice 8 (UNI EN 1998-1:2004)
Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici

Indicazioni specifiche per edifici esistenti:

- Eurocodice 8: (UNI EN 1998-3:2005)
Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
Parte 3: Valutazione e adeguamento degli edifici

Altra documentazione rilevante

Linee guida regionali di particolare interesse:

- Regione Basilicata: Linee guida per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici strategici e rilevanti (ottobre 2005)
- Regione Abruzzo: Linee guida per la valutazione della resistenza sismica degli edifici strategici e rilevanti (giugno 2007)

Altra documentazione:

- Documenti prodotti dal GNDT (Gruppo Nazionale Difesa Terremoti), in particolare Progetto SAVE
 - si veda il sito <http://gndt.ingv.it/>

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

Le costruzioni esistenti devono essere verificate quando ricorre una delle seguenti situazioni:

- Riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa per azioni ambientali (sisma o altro)
- Significativo degrado dei materiali
- Eventi eccezionali (incendi, esplosioni)
- Deformazioni significative dovute a cedimenti di fondazione
- Gravi errori di progetto o costruzione
- Cambio di destinazione d'uso con variazione significativa dei carichi

NTC 08, punto 8.3

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
 - In genere il punto principale è giudicare se i dissesti hanno ridotto o compromesso gravemente la capacità di portare carichi verticali
 - Il giudizio è sostanzialmente indipendente dalla capacità della struttura di sostenere l'azione sismica, ma questo deve essere precisato chiaramente nella relazione

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
 - Occorre principalmente valutare se la struttura ha subito danni che riducono in maniera sensibile la sua capacità portante nei confronti di azioni orizzontali
 - Nel giudizio, precisare sempre che si tratta di una valutazione comparativa (prima - dopo il danneggiamento da sisma) e non assoluta
 - Attenzione alle carenze strutturali gravi, che possono comunque rendere la struttura estremamente insicura nei confronti del sisma

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
 - Si tratta di una valutazione di tipo probabilistico, usata per scelte generali, "politiche"

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
- Valutare il grado di sicurezza dell'edificio nei confronti delle azioni sismiche
Ovvero "valutazione della vulnerabilità dell'edificio"

Valutazione della vulnerabilità di un edificio esistente

In genere quando si parla di "valutare la vulnerabilità di un edificio esistente" si intende:

- Determinare quale valore dell'accelerazione di picco al suolo porta al raggiungimento del limite di resistenza (o di deformazione plastica) della struttura
 - Si tratta di una analisi deterministica, non probabilistica
 - Rientra nell'ambito della valutazione della sicurezza (NTC 08, punto 8.3), come meglio specificato nella Circolare (punto C8.3)

Quando siamo chiamati ad occuparci di edifici esistenti?

- Esprimere un giudizio sull'agibilità per dissesti (reali o presunti) indipendenti da eventi sismici
- Esprimere un giudizio sull'agibilità dopo un evento sismico
- Valutare il rischio sismico o la vulnerabilità sismica per ampi insiemi di edifici
- Valutare il grado di sicurezza dell'edificio nei confronti delle azioni sismiche
- Progettare interventi per il miglioramento o adeguamento sismico dell'edificio

Perché occorrono norme specifiche per gli edifici esistenti?

ovvero, che differenza c'è tra nuove costruzioni e costruzioni esistenti?

Nuove costruzioni

Il progettista ha piena libertà per definire:

- Geometria della struttura
- Dettagli costruttivi
- Materiali

Il progettista può quindi:

- Fare le scelte opportune per consentire alla struttura un buon comportamento durante il sisma

Ad esempio:

- Edifici in c.a.: Gerarchia delle resistenze
- Edifici in muratura: Evitare collasso delle pareti fuori piano

Costruzioni esistenti

È tutto già definito:

- Geometria della struttura
- Dettagli costruttivi
- Materiali

Il comportamento sarà diverso da quello ideale desiderato:

Ad esempio:

- Edifici in c.a.: Rischio di rotture fragili o collasso di piano
- Edifici in muratura: Rischio di collasso delle pareti fuori piano

Valutazione della sicurezza di una costruzione esistente

Nascono problemi specifici:

- Conoscenza della struttura
 - La costruzione riflette lo stato delle conoscenze (regola d'arte) al tempo della loro edificazione
 - La costruzione può contenere difetti di impostazione concettuale e di realizzazione che non sono direttamente visibili o evidenziabili
 - La costruzione può aver già sopportato in passato terremoti (più o meno violenti) od altre azioni eccezionali, i cui effetti possono essere più o meno manifesti
 - La costruzione può presentare degrado e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria

NTC 08, punto 8.2

Valutazione della sicurezza di una costruzione esistente

Nascono problemi specifici:

- Conoscenza della struttura
 - Per svolgere qualsiasi tipo di analisi è necessario conoscere meglio possibile l'organismo strutturale, nello stato effettivo in cui si trova
 - Non è possibile raggiungere la conoscenza "completa" di un edificio esistente, per cui vi saranno sempre dei margini di incertezza
 - Nella valutazione della sicurezza o nella progettazione degli interventi occorre tener conto del margine di incertezza corrispondente al livello di approfondimento conseguito

Valutazione della sicurezza di una costruzione esistente

Problematiche:

- Conoscenza della struttura
- Modellazione della struttura
 - La geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende solo dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive
 - La conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali non risente delle incertezze legate alla produzione e posa in opera ma solo dell'omogeneità dei materiali all'interno della costruzione e del livello di approfondimento delle indagini
 - I carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini

NTC 08, punto 8.2

Valutazione della sicurezza di una costruzione esistente

Problematiche:

- Conoscenza della struttura
- Modellazione della struttura
- Analisi globale del comportamento della struttura
 - Può essere opportuno utilizzare metodi di analisi più sofisticati di quelli usati per le nuove costruzioni (ad esempio analisi non lineari)
 - La scelta dei metodi di analisi e verifica dipende dalla completezza ed affidabilità della informazione disponibile
 - Nelle verifiche occorre usare adeguati coefficienti di sicurezza ("fattori di confidenza"), per tener conto del livello di conoscenza raggiunto

NTC 08, punto 8.2

Collasso di un edificio: come avviene ?

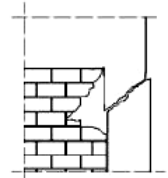
Collasso di un edificio

- Rottura fragile:
 - rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi
 - rotture a taglio dei nodi
 - scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di getto
- Rottura duttile (ovvero per esaurimento della duttilità):
 - estese plasticizzazioni agli estremi delle aste, fino al raggiungimento della rotazione ultima di una sezione

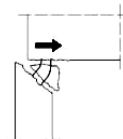
Rottura fragile rottura a taglio di un pilastro



Rottura diagonale
della muratura e
propagazione come
lesione a taglio nel
pilastro



Rottura fragile rottura a taglio di un pilastro



Rottura fragile rottura a taglio dei pilastri (e dei nodi)



1999 - Turchia



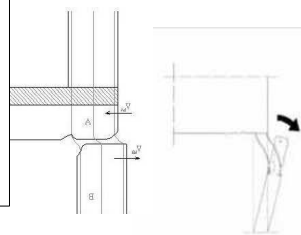
foto A. Ghersi

Rottura fragile scorrimento fra testa pilastro e trave



Irpinia 1980.
Lioni. Edificio del
Banco di Napoli

foto A. Ghersi



Scorrimento tra la sommità del pilastro
e la trave in corrispondenza
della ripresa di getto

Rottura fragile sconnessione dei collegamenti nodali



foto A. Ghersi

Danneggiamento dei nodi in testa ed al piede del pilastro:
non si ha formazione di cerniere plastiche sulla colonna
né tantomeno sulle travi

Rottura fragile sfilamento delle armature



foto A. Ghersi

23/11/1980 - Irpinia e Basilicata

S. Angela dei Lombardi
edificio 2

Collasso di un edificio

- Rottura fragile:
 - rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi
 - rotture a taglio dei nodi
 - scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di getto
- Rottura duttile (ovvero per esaurimento della duttilità):
 - estese plasticizzazioni agli estremi delle aste, fino al raggiungimento della rotazione ultima di una sezione

Rottura duttile plasticizzazione degli estremi dei pilastri



1999 - Turchia

Rottura duttile plasticizzazione degli estremi dei pilastri



1999 - Turchia

Collasso di edifici esistenti: fragile o duttile?

- Fragile:
rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi, rotture a taglio dei nodi, scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza a riprese di getto
- Poco duttile:
plasticizzazioni agli estremi dei pilastri, con meccanismo di collasso di piano
- Veramente duttile:
estese plasticizzazioni agli estremi delle aste (in particolare delle travi), meccanismo di collasso globale e non di piano

Collasso di edifici esistenti: fragile o duttile?

Edifici antisismici di nuova progettazione:

- Rottura fragile:
 - la rottura fragile viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze (gerarchia taglio-flessione) e con l'attenzione ai dettagli costruttivi
- Rottura duttile:
 - la duttilità locale è garantita dai dettagli costruttivi
 - una richiesta eccessiva di duttilità viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze (gerarchia pilastro-trave, per evitare meccanismi di piano)

Collasso di edifici esistenti: fragile o duttile?

Edifici esistenti:

- Rottura fragile:
 - forti carenze nelle staffe di pilastri e nodi portano spesso ad un elevato rischio di rottura già per bassi valori di a_g
- Rottura duttile:
 - la duttilità locale potrebbe essere modesta
 - potrebbero esserci meccanismi di piano che fanno esaurire presto la duttilità

Collasso di edifici esistenti: fragile o duttile?

- Cosa mostra l'evidenza sperimentale ?
(danneggiamento e crollo di edifici in cemento armato in conseguenza ai terremoti)

Edifici progettati solo per carichi verticali o progettati per sisma in maniera non corretta (con rispetto solo formale della normativa)



In questi casi il collasso è quasi sempre fragile

Collasso di edifici esistenti: fragile o duttile?

- Cosa mostra l'evidenza sperimentale ?
(danneggiamento e crollo di edifici in cemento armato in conseguenza ai terremoti)

Edifici progettati correttamente per sisma (indipendentemente dalle normative di riferimento) o progettati solo per carichi verticali, ma con una particolare cura di progetto e dettagli costruttivi (buone sezioni dei pilastri, ben armate e molto ben staffate)



In questi casi il collasso è spesso duttile

Rottura fragile

- Edifici esistenti:
 - il rischio di rottura fragile è forte
 - la rottura spesso avviene già per bassi valori di a_g

Se è questo l'aspetto predominante:

- Si possono verificare in termini di resistenza, con analisi lineare, senza fattore di struttura (o con valore molto basso)
- La variabilità della resistenza dei materiali influisce molto, perché il collasso è dovuto alla rottura di una singola sezione

Rottura duttile

ovvero per esaurimento della duttilità

- Edifici esistenti:
 - la duttilità locale potrebbe essere modesta
 - potrebbero esserci meccanismi di piano che fanno esaurire presto la duttilità

Se è questo l'aspetto predominante:

- Si possono verificare in termini di resistenza, con analisi lineare, con basso fattore di struttura ...
... ma sarebbe meglio farlo in termini di deformazioni, con analisi lineare o non lineare
- La variabilità della resistenza dei materiali influisce poco, la maggior resistenza di una sezione può compensare la minor resistenza di un'altra

Collasso di edifici esistenti:

in molti casi: fragile!

Quindi:

- Determinare innanzitutto il livello di azione sismica che porta a rottura fragile (resistenza a taglio dei pilastri, resistenza a taglio dei nodi, scorrimento travi-pilastro)
- Usare una modellazione che tenga conto in maniera corretta della rigidità degli elementi strutturali (commisurata al livello di sollecitazione che porta alle rotture fragili)
- Tenere conto anche degli elementi non strutturali, tramezzi e tamponature, che hanno un ruolo rilevante per basse azioni sismiche

Schema generale del procedimento di analisi

Procedimento da seguire

1. Valutazione preliminare delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati
2. Analisi lineare (modale con spettro di risposta):
fornisce caratteristiche di sollecitazione e spostamenti (che sono proporzionali ad a_g)
 - giudizio in termini di sollecitazioni e di spostamenti
3. Solo se necessario: analisi non lineare
 - giudizio in termini di spostamenti

Procedimento da seguire

1 - valutazione preliminare

1. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati
 - È opportuno farla sempre, per cogliere l'ordine di grandezza delle sollecitazioni ed individuare quali possono essere i problemi principali
 - È utile come validazione dei calcoli successivi (o almeno dei calcoli lineari), ai sensi del capitolo 10 delle NTC08
 - Può fornire indicazioni anche per quanto riguarda le indagini da effettuare in sito e sui materiali

Procedimento da seguire

2 - analisi lineare

2. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)
 - I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Prima fase: rotture fragili

 - Confronto tra taglio sollecitante e taglio resistente
 - Individuazione di a_g che porta a rottura a taglio (se M_{Rd} è basso si potrebbe non avere mai rottura a taglio)
 - Verifica di altre possibili rotture fragili

Procedimento da seguire 2 - analisi lineare

2. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)

- I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Seconda fase: plasticizzazione delle sezioni

- Confronto tra momento sollecitante e resistente
- Individuazione di a_g che porta a plasticizzazione a flessione
- Esame della distribuzione dei rapporti M_{Ed}/M_{Rd} che mostrano se il collasso è globale → indicazioni su q

Procedimento da seguire 2 - analisi lineare

2. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)

- I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Terza fase: controllo in termini di deformazioni

- Confronto tra spostamenti relativi di calcolo e valori limite dovuti alla rotazione alla corda
- Controllo dei limiti di applicabilità di questo procedimento (valori di ρ)

Procedimento da seguire 3 - analisi non lineare

3. Analisi pushover e individuazione di a_g corrispondente ai singoli punti della curva taglio-spostamento

- Confronto tra spostamenti relativi di calcolo e valori limite dovuti alla rotazione alla corda

Attenzione:

I risultati di questa analisi sono fortemente condizionati dalla modellazione e dai parametri scelti e potrebbero essere privi di significato.

Usarla solo se necessario e solo come passo finale del procedimento indicato

Quali valori per la resistenza dei materiali?

Valori della resistenza impostazione standard (nuove costruzioni)

- Valore di riferimento:
il valore caratteristico f_k (frattile 5%, cioè valore al di sotto del quale si scende solo nel 5% dei casi)
 - Si noti che, oltre alle incertezze sulla variabilità della resistenza intervengono quelle relative alla effettiva rispondenza tra progetto ed esecuzione
- Valore di calcolo:
per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una sezione, si usa il valore corrispondente a un frattile più basso $f_d = f_k / \gamma_M$

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Le incertezze dovute alla variabilità permangono, ma quelle dovute alla rispondenza tra progetto ed esecuzione possono essere eliminate se si raggiunge una conoscenza accurata dell'opera



È possibile usare un valore di riferimento più alto

- Le NTC08 (punto 8.7.2) dicono che "si impiegano le proprietà dei materiali esistenti"
- La Circolare indica come riferimento il valore medio f_m (tra i dati ottenuti sperimentalmente)
- Se la conoscenza non è "accurata" il riferimento è il valore medio f_m diviso un fattore di confidenza FC

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Valore di riferimento:
il valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore di confidenza FC : $\frac{f_m}{FC}$

Nota: quando un valore alto della resistenza può essere "peggiorativo" occorre usare il fattore di confidenza all'incontrario, cioè usare come valore di riferimento:

$$f_m \times FC$$

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Valore di riferimento:
il valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore di confidenza FC : $\frac{f_m}{FC}$

- Valore di calcolo:
per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una sezione, si usa un valore corrispondente a un frattile più basso: $\frac{f_m}{FC \gamma_M}$

ma questo vale quando ci preoccupiamo del comportamento "fragile" di una singola sezione

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Valore di riferimento:
il valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore di confidenza FC : $\frac{f_m}{FC}$

- Valore di calcolo:
per verifiche del comportamento "fragile" di una singola sezione :

$$\frac{f_m}{FC \gamma_M}$$

per verifiche del comportamento globale "duatile" di una struttura :

$$\frac{f_m}{FC}$$

Nota: potrebbe aver senso applicare questa distinzione anche nel progetto di nuove strutture

Quando si usa la resistenza col valore di riferimento ?

- Nelle verifiche "duatili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui si pensa alla contemporanea plasticizzazione di molte sezioni (quindi per i telai)

Tipicamente:

- Nelle verifiche a flessione (in condizioni sismiche)

Questo va bene purché la singola sezione non abbia un comportamento flessionale fragile. Attenti a:

- Sezioni con armatura tesa molto forte e armatura compressa scarsa
- Sezioni (di pilastri) con rilevante sforzo normale

Quando si usa la resistenza col valore di riferimento ?

- Nelle verifiche "duatili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui si pensa alla contemporanea plasticizzazione di molte sezioni

Tipicamente:

- Nelle verifiche a flessione (in condizioni sismiche)

E in condizioni non sismiche?

Può andar bene purché la singola sezione non abbia un comportamento flessionale fragile e a condizione che la struttura non sia isostatica o poco iperstatica

Resistenza valore di riferimento

- Esempio

Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

- Per il calcestruzzo $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

e si deve usare $FC = 1.2$

Il valore di riferimento sarà:

- Per il calcestruzzo $f_{c,rif} = 19/1.2 = 15.83 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{y,rif} = 420/1.2 = 350 \text{ MPa}$

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc} f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo $\alpha_{cc} = 0.85$ si userà $f_c = 13.46 \text{ MPa}$)

Quando si usa la resistenza ridotta con γ_M ?

- Nelle verifiche "fragili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui il collasso di una singola sezione può portare a un crollo (senza grande preavviso)

Tipicamente:

- Nelle verifiche a taglio (anche per soli carichi verticali, in assenza di sisma)

Ma anche:

- Nelle determinazione della capacità di rotazione delle sezioni dei pilastri (molto condizionata dal rapporto N_{Ed} / N_{Rd} e quindi dalla resistenza del materiale)

Resistenza ridotta con γ_M

- Esempio

Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

- Per il calcestruzzo $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

e si deve usare $FC = 1.2$

Nelle verifiche a comportamento "fragile" si userà:

- Per il calcestruzzo ($\gamma_c=1.5$) $f_{cd} = 15.83/1.5 = 10.56 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio ($\gamma_s=1.15$) $f_{yd} = 350/1.15 = 304.3 \text{ MPa}$

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc} f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo $\alpha_{cc}=0.85$ si userà $f_{cd} = 8.97 \text{ MPa}$)

Quando si usa la resistenza incrementata ?

- Solo quando si vuole escludere la possibilità di rotture a taglio

Nei pilastri il taglio non può superare il valore:

$$V_{max} = 2 M_{Rd} / l_p$$

Si può escludere rottura a taglio se $V_{Rd} > V_{max}$ ma per farlo bisogna massimizzare M_{Rd} e quindi calcolarlo con le resistenze incrementate

Resistenza incrementata

- Esempio

Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

- Per il calcestruzzo $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

e si deve usare $FC = 1.2$

Quando la maggiore resistenza è penalizzante si usa:

- Per il calcestruzzo $f_{c,rif} = 19 \times 1.2 = 22.8 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{y,rif} = 420 \times 1.2 = 504 \text{ MPa}$

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc} f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo $\alpha_{cc}=0.85$ si userà $f_c = 19.38 \text{ MPa}$)