ANALISI DI VULNERABILITA' SISMICA DI UN EDIFICIO SCOLASTICO

Autori: Ing. Giandomenico Pino, Ing. Giampiero Bertora, Ing. Barbara Calandri, Studio Pino & Bertora, Imperia

Hanno collaborato:

- ing. Paolo Sattamino, Resp. Sett. Calcolo Strutturale e Geotecnico Harpaceas s.r.l.,

- Ing. Adalgisa Zirpoli, Assistenza Tecnica Sett. Calcolo Strutturale e Geotecnico Harpaceas s.r.l.

INTRODUZIONE

Gli eventi sismici che negli ultimi anni hanno colpito il nostro Paese, dal crollo della scuola di San Giuliano di Puglia al più recente sisma abruzzese, con la loro pesante scia di dolore e di danno economico hanno indotto il Legislatore ad introdurre nuove e più severe metodologie di calcolo per le nuove costruzioni e ad impostare un'accurata campagna di indagini e di valutazione del patrimonio edilizio pubblico.

Tutto questo si è tradotto dapprima nell'individuazione degli edifici di interesse strategico e rilevante e nella conseguente campagna di studi al fine di verificarne la vulnerabilità al sisma, ed in seguito nella stesura e nell'entrata in vigore nelle nuove Norme Tecniche per le Costrizioni (NTC 2008).

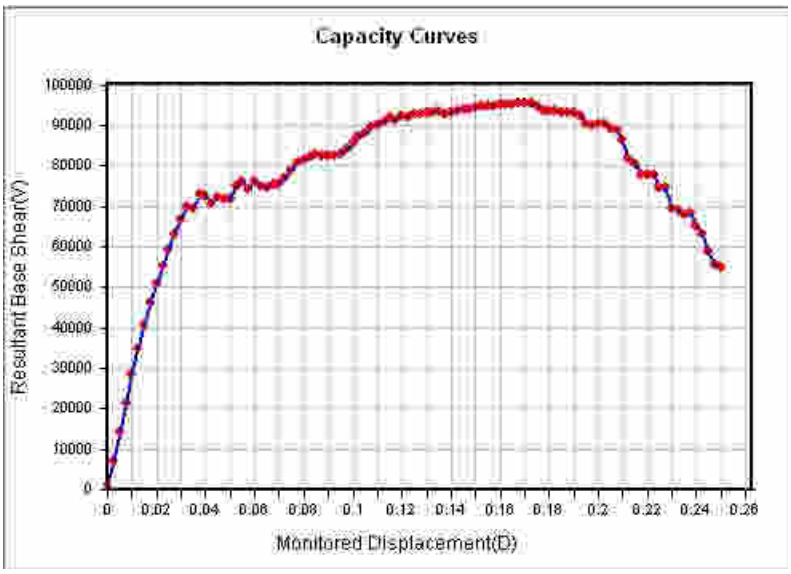
Nell'ambito di questo quadro politico e normativo si inserisce l'analisi strutturale sull'edificio scolastico "Niccolò Martini" di seguito descritta: essa è stata commissionata dal Comune di Pietra Ligure a seguito dell'inserimento del fabbricato nell'elenco degli edifici di importanza rilevante (si veda l'allegato 1 – elenco B - del D.P.C.M. 21/10/2003 n. 3685).

L'obiettivo della verifica è stato quello di valutare il comportamento sismico della struttura e la sua capacità nei confronti delle azioni sismiche di progetto indicate dalla norma (NTC2008): i risultati dell'analisi hanno permesso, quindi, di indicare alla Pubblica Amministrazione gli interventi necessari per adeguare il comportamento della struttura alle richieste normative.

TIPOLOGIA DI ANALISI

La tipologia di analisi utilizzata per la verifica della struttura è un'*analisi statica non lineare*, così come definita dal D.M. 14/01/2008 (nota in letteratura con il nome di *analisi pushover*): questa prevede l'applicazione incrementale al modello della struttura di particolari distribuzioni di carico orizzontali, al fine di spingere in campo non lineare la struttura fino a portarla al collasso; durante l'analisi le forze applicate vengono scalate in modo da far crescere lo spostamento orizzontale di un punto di controllo della struttura, solitamente individuato nel baricentro dell'ultimo impalcato.

Con questa metodologia di analisi si riesce a descrivere la risposta della struttura alle azioni orizzontali, e quindi l'evoluzione del suo danneggiamento, in funzione dello spostamento del nodo di controllo; dall'analisi, infatti, si ottiene una curva, detta *curva di capacità*, che descrive il valore dello spostamento del nodo di controllo (D) al crescere del taglio alla base (V).



Le verifiche richieste si concretizzano, pertanto, nel confronto fra la curva di capacità per le diverse condizioni di carico previste e la domanda di spostamento prevista dalla normativa: lo spostamento massimo d_{max}, valutato **mediante utilizzo dello spettro di risposta elastico (espresso in termini di spostamento)** dovrà essere confrontato con il valore d_u individuato sulla curva di capacità; in particolare, la struttura risulta verificata nel caso in cui, per ogni stato limite preso in considerazione, valga:

$$d_{max} \leq d_u.$$

In particolare, per lo stato limite ultimo SLU vale:

d_u = spostamento massimo della struttura in corrispondenza di un decadimento del taglio alla base pari al 15% del suo valore di picco;

per lo stato limite di danno SLD vale:

d_u = spostamento massimo della struttura in corrispondenza del superamento del valore massimo di drift di piano (pari al 5‰).

La verifica deve essere effettuata, per ciascuna direzione, in entrambi i versi e per i due differenti sistemi di forze orizzontali in modo da considerare gli effetti più sfavorevoli per la struttura.

Si deve, inoltre, procedere alla verifica della compatibilità degli spostamenti per gli elementi duttili e delle resistenze per gli elementi fragili (Circolare 2 febbraio 2009, n. 617).

OPERAZIONI PRELIMINARI ALLA MODELLAZIONE

La fase propedeutica alla modellazione ed alla verifica della struttura consistite nella predisposizione di quanto previsto al punto C8.5 della Circolare n. 617/2009 e precisamente:

C8.5.1 - analisi storico critica mediante ricerca presso gli uffici comunali e provinciali della documentazione disponibile, oltre ad una consultazione di testi e/o documenti fotografici risalenti all'epoca dell'edificazione;

C.8.5.2 – rilievo della struttura con l'ausilio dei progetti acquisiti, verifica e determinazioni delle armature mediante demolizioni puntuali ed indagini *pachometriche*;

C8.5.3 – caratterizzazione meccanica dei materiali mediante esecuzione di prove distruttive e non distruttive da eseguire sul fabbricato,quali carotaggi, prelievi di barre d'armatura, prove sclerometriche e soniche.

Le indagini così effettuate hanno permesso di raggiungere una conoscenza della struttura pari a LC2 (livello di conoscenza 2).

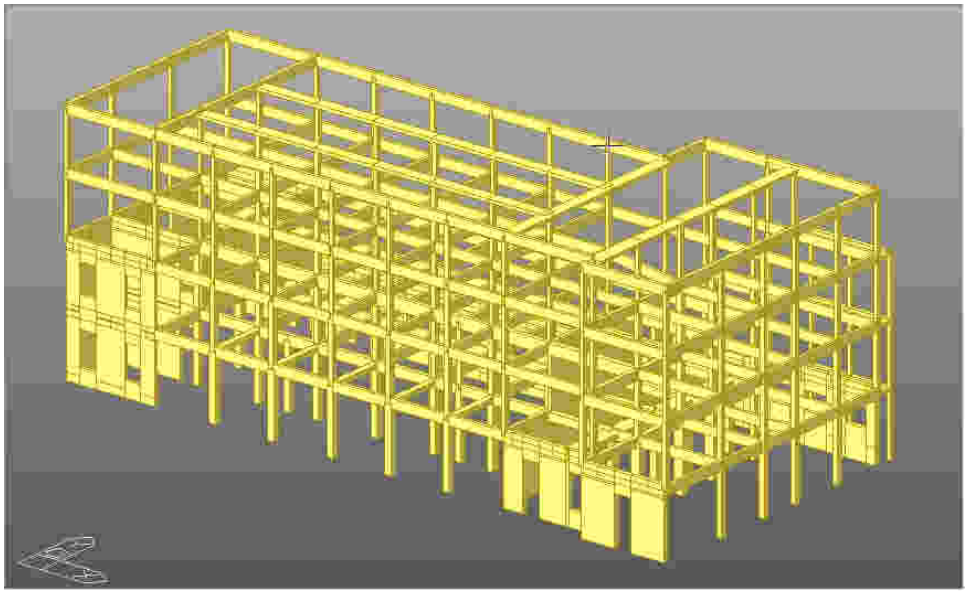
MODELLAZIONE ED ANALISI DELLA STRUTTURA

Il fabbricato scolastico è costituito da un corpo principale in cemento armato, destinato ad accogliere le aule ed i locali di servizio, edificato negli anni '30 e sopraelevato di un piano negli anni '70, e da un corpo secondario in cemento armato, che accoglie alcuni locali di servizio ed il vano scale, edificato in aderenza (ma non collegato al corpo principale) nello stesso periodo della sopraelevazione.

Per la modellazione della struttura, e la relativa procedura di verifica, è stato utilizzato il codice di calcolo *Midas Gen*, versione 2010 (v 1.1).

La struttura reale è stata schematizzata con un modello costituito da elementi *beam* (travi e pilastri), distinti per sezione, armatura e caratteristiche meccaniche, fra loro collegate da nodi rigidi; questi ultimi simulano il comportamento reale dei nodi fra travi e pilastri che, tipicamente, sono meno soggetti al danneggiamento indotto dalle azioni sismiche; le murature portanti in cemento, presenti ai primi due ordini, sono state modellate con un telaio equivalente costituito da elementi *beam* ad asse verticale ed orizzontale e da bracci infinitamente rigidi (*rigid offset*).

La struttura è stata vincolata alla base mediante incastri.

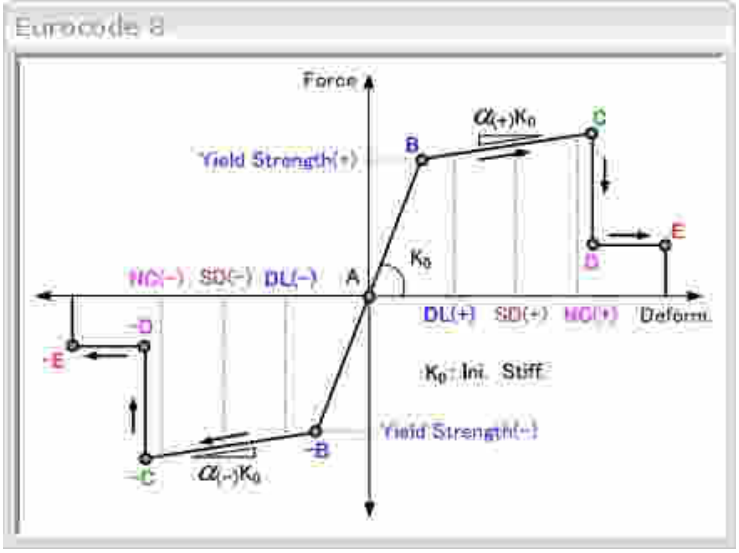


E' stato poi determinato il comportamento della struttura in campo non lineare mediante l'analisi pushover: la metodologia prevista per questo caso di studio è definita a *plasticità concentrata*; questa è ampiamente descritta in letteratura e presenta delle semplificazioni numeriche che la rendono relativamente snella dal punto di vista computazionale ed adeguatamente attendibile nei risultati.

Questo approccio metodologico prevede che gli elementi della struttura sviluppino un comportamento non lineare solo in corrispondenza di punti specifici (tipicamente gli estremi e la mezzeria), definiti *cerniere plastiche*: queste descrivono, nel punto di analisi, la deformazione

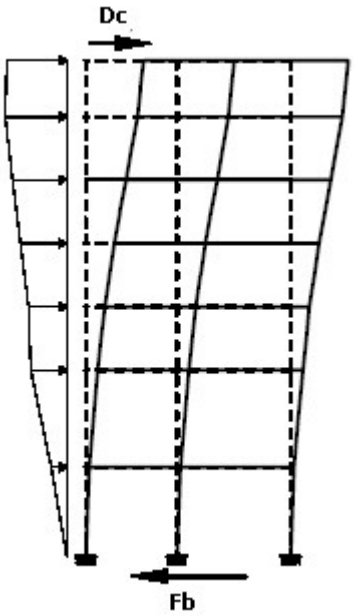
dell'elemento al crescere delle azioni, tenendo conto del comportamento non lineare dei materiali; al crescere dell'azione orizzontale la cerniera sviluppa crescenti livelli di plasticizzazione fino alla rottura dell'elemento.

Nel corso della modellazione, quindi, sono state associate diverse cerniere plastiche ad ogni elemento del modello: in particolare, ai pilastri sono state assegnate due cerniere a taglio (descrivono i fenomeni di rottura fragile) ed una cerniera rotazionale (descrivono in fenomeni di rottura duttile); alle travi, invece, sono state assegnate una cerniera a taglio ed una rotazionale. Le caratteristiche di deformazione delle cerniere sono quelle definite dall'*eurocodice 8*.



Le cerniere plastiche si sviluppano, quindi, al crescere delle forze orizzontali applicate alla struttura; i sistemi di forze previsti per l'analisi pushover sono due:

- un sistema di forze proporzionali alle masse;
- un sistema di forze proporzionali al prodotto fra la massa e lo spostamento del primo modo di vibrare proprio della direzione presa in considerazione.



L'analisi pushover deve,quindi, essere preceduta da un'analisi modale: questa consente di calcolare le masse e gli autovettori con i quali si definiscono i sistemi di forze orizzontali che devono essere applicati alla struttura.

Essa rappresenta, inoltre, un ottimo strumento di valutazione preliminare della modellazione strutturale: infatti, osservando le deformate dei diversi modi di vibrare si possono individuare (e quindi eliminare) quelle anomalie che sicuramente portano dei problemi nella successiva analisi non lineare (ad esempio, nodi di estremità degli sbalzi, nodi su cui si scaricano elementi in falso, ecc.).

Si tratta di una fase molto delicata dell'analisi, poiché modelli troppo complessi o, al contrario, modelli che presentano semplificazioni troppo grossolane possono portare a risultati non rispondenti ai reali comportamenti della struttura: ed è proprio leggendo i risultati di un'analisi modale, sulla quale generalmente il progettista a maggiore esperienza, che si possono individuare con maggior facilità eventuali errori di modellazione.

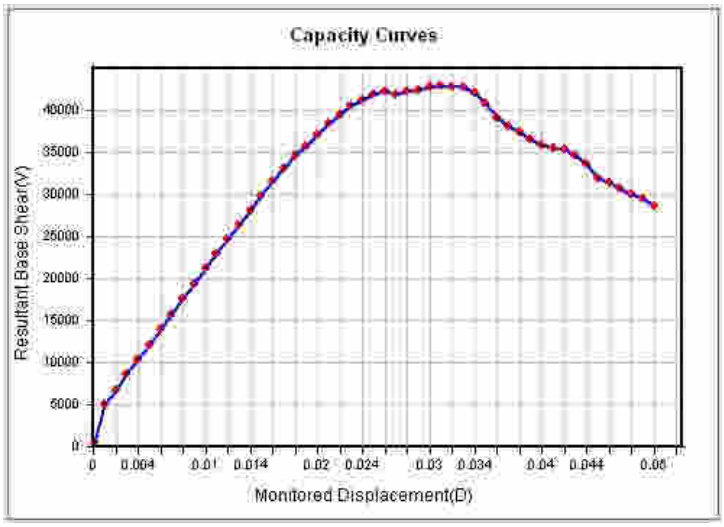
Il modello strutturale così definito deve poi essere completato con i dati relativi alle caratteristiche dei materiali (C8.5.3.) e le armature proprie delle diverse sezioni individuate nel corso del rilievo (C8.5.2): questa fase di inserimento dei dati può essere piuttosto onerosa nel caso si strutture di grandi dimensioni e/o dalla geometria complessa.

Una volta raccolti tutti i dati necessari si può procedere con l'analisi pushover: questa deve essere effettuata per le 24 condizioni di carico previste dalla normativa; come si vede l'onere computazionale è piuttosto elevato, per cui si è scelto di procedere con la verifica sismica solo per la condizione di carico più gravosa.

In prima battuta si deve analizzare la forma della curva di capacità: questa descrive in maniera estremamente sintetica, ma anche molto efficace, il comportamento sismico della struttura. Nel caso specifico si è ottenuta una curva piuttosto breve: infatti, come è naturale aspettarsi da una struttura concepita per resistere alle sole azioni verticali, al crescere delle azioni orizzontali gli elementi tendono a plasticizzarsi piuttosto rapidamente esaurendo così, già per piccoli spostamenti, la capacità di resistere alle azioni del sisma. Dall'analisi numerica dei risultati si è ottenuto:

$$d_{max} = 5{,}545 > d_u = 3{,}9 \text{ cm (SLV)} – \text{NON VERIFICATO.}$$

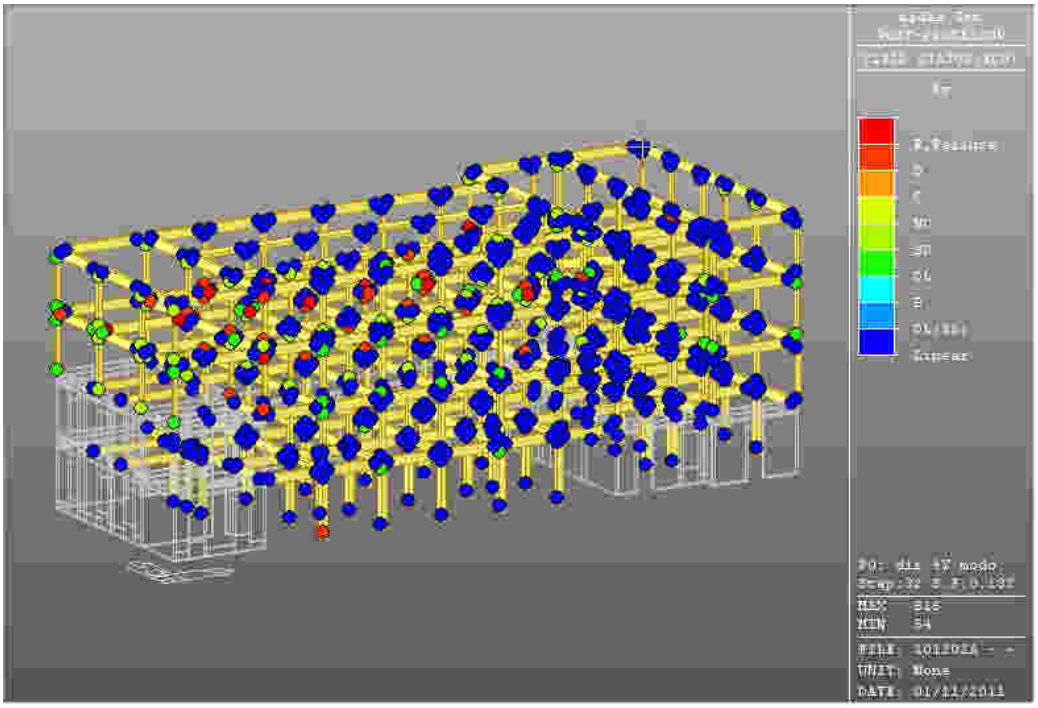
L'andamento della curva, però, ci segnala anche un decadimento progressivo: questo significa che la struttura, pur avendo una limitata capacità di resistenza alle azioni orizzontali, tende a plasticizzarsi sviluppando gradualmente la sua capacità senza presentare improvvise cadute.



Per quanto riguarda lo Stato Limite di Danno, la struttura presenta un buon comportamento:

$$d_{max} = 1{,}45 < d_u = 2{,}5 \text{ cm (SLD)} – \text{VERIFICATO.}$$

Una ulteriore, e molto importante, indicazione che emerge dai risultati dell'analisi del modello strutturale è l'andamento della formazione delle cerniere plastiche nei diversi elementi: infatti, è possibile osservare graficamente come si sviluppano le cerniere al crescere delle azioni orizzontali ed individuare, quindi, gli elementi più deboli della struttura o quelli per i quali si possono avere le conseguenze più gravi in caso di rottura.



CONCLUSIONI

L'analisi del modello strutturale ha dato quindi una risposta numerica che consente di indicare alla Committenza l'effettiva capacità di risposta sismica della struttura e gli interventi necessari al suo adeguamento.

Si vuole, in conclusione, sottolineare quanto l'analisi *pushover*, pur essendo ancora poco diffusa nella corrente pratica professionale, rappresenti uno strumento di analisi molto potente che consente ai progettisti di fornire risposte alle domande, sempre molto complesse, che si pongono nello studio degli edifici esistenti.