

IL RUOLO DEI DATI DI DANNEGGIAMENTO DEL TERREMOTO DEL FRIULI NELLO STUDIO DI MODELLI DI VULNERABILITA' SISMICA DEGLI EDIFICI IN MURATURA

Stefano Grimaz, Fabrizio Meroni, Vincenzo Petrini, Roberto Tomasoni, Gaetano Zonno

*Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico - Consiglio Nazionale delle Ricerche, V. Bassini, 15 - 20133 MILANO.
Tel. 02/23699282, Fax. 02/26680987, E-mail: meroni@irrs.mi.cnr.it*

SUMMARY

The relationships between the level of seismic action and the damage index, for different values of building vulnerability, is crucial in seismic risk assessment. This paper deals with recent evolution of vulnerability models based on the definition of a vulnerability index and with some development in the choice of the damage index. In the paper are also summarised the efforts aimed to enlarge the available data base of buildings documented enough to evaluate vulnerability and damage indices. Finally the parameter defining the vulnerability model are evaluated using data from the Friuli (1976) and Central Italy (1984) earthquakes. The availability of data collected in sites characterised by different macroseismic intensities (from VII to IX MCS) and the use of the new vulnerability and damage indices, permit to reach a good level of correlation between the considered entities.

1. INTRODUZIONE

Le prime valutazioni di vulnerabilità in Italia sono state effettuate in seguito al terremoto Campano-Lucano del 23 novembre 1980. Esse hanno utilizzato i rilievi di danno effettuati immediatamente dopo quel terremoto ed hanno portato alla determinazione di matrici di probabilità di danno per tredici classi tipologiche (Braga et al., 1982); successivamente le tredici classi sono state raggruppate e ridotte alle quattro classi utilizzate dalla scala di intensità MSK; le matrici sono state successivamente affinate sulla scorta dei rilievi di danno seguiti al terremoto dell'Italia Centrale del 1984 (Braga et al., 1984).

Le matrici di probabilità di danno forniscono, per ogni classe tipologica, le probabilità associate ad ognuno dei sei gradi di danno (nullo, lieve,, collasso) per un assegnato grado della scala MSK.

Poco prima del terremoto del 1984 era stato proposto un diverso approccio per gli edifici in muratura (Benedetti e Petrini, 1984) basato sulla definizione di un indice di vulnerabilità; esso ha trovato applicazione per la prima volta in occasione del rilevamento di vulnerabilità e danno effettuato in seguito al terremoto di Parma del Novembre 1983. L'indice fornisce una misura convenzionale e relativa della vulnerabilità in una scala nella quale lo zero identifica un edificio costruito secondo le normative vigenti.

L'indice di vulnerabilità è definito in base ad undici parametri che sono stati ritenuti idonei a caratterizzare il comportamento sismico di un edificio; nella formulazione attuale essi sono:

1. Tipo ed organizzazione del sistema resistente
2. Qualità del sistema resistente
3. Resistenza convenzionale
4. Posizione edificio e fondazioni
5. Orizzontamenti
6. Configurazione planimetrica
7. Configurazione in elevazione
8. Distanza massima murature
9. Copertura
10. Elementi non strutturali
11. Stato di fatto

Per ogni parametro sono state definite quattro classi ad ognuna delle quali è assegnato un punteggio numerico p_i ad ogni parametro è assegnato un peso w_i . L'indice di vulnerabilità è definito come somma pesata dei punteggi relativi ad ogni parametro:

$$v = \sum_i p_i w_i \quad (1)$$

Il metodo dell'indice di vulnerabilità è stato esteso con limitate modifiche al caso di edifici in cemento armato (Angeletti e Gavarini, 1984).

Negli anni successivi sono state definite schede per il rilevamento della vulnerabilità; esse sono state più volte affinate fino ad assumere l'aspetto di quelle attualmente in uso nell'ambito dei programmi di ricerca del G.N.D.T. (GNDDT, 1994). Una sezione di tali schede (Sezione 8 - Estensione e livello del danno) è dedicata al rilevamento del danno secondo lo schema riportato in figura 1.

In tale sezione si registra, per ogni piano dell'edificio, il

danno nelle diverse componenti costruttive (strutture verticali, strutture orizzontali, scale, tamponature) in base a sei stati di danno (nullo, lieve, medio, grave, gravissimo, totale). I dati sono organizzati in 4 matrici separate e sono codificati con lettere da A a F corrispondenti a crescenti livelli di danno. Ogni riga della matrice contiene le informazioni su un piano dell'edificio dal basso verso l'alto; in caso di medesimo livello di danneggiamento su piani contigui, viene riempita una sola riga della matrice ed il numero di piani danneggiati omogeneamente viene caricato nell'ultima colonna della matrice. Sulla base dei dati descritti nella figura 1 e associando ai livelli di danno A, B, C, ..., F i valori numerici 0, .2, .4,,1, si costruisce per ogni piano e per ogni componente l'indice di danno:

$$D_{ij} = EL + \frac{1-E}{3} M \quad (2)$$

L'indice di danno per l'intero edificio si ottiene in base alla relazione (Angeletti, 1984; Angeletti et al., 1988):

$$d = \sum_{ij} S_i F_j D_{ij} \quad (3)$$

dove F_j sono pesi proporzionali al volume o alla superficie del piano j -esimo e S_i sono pesi proporzionali all'incidenza economica della componente i -esima. L'indice di vulnerabilità v e l'indice di danno d sono stati utilizzati per definire relazioni tra danno, vulnerabilità ed entità dell'azione sismica (Angeletti et al., 1988; Guagenti e Petrini, 1989).

L'approccio proposto nel secondo lavoro assume una relazione lineare a tratti tra accelerazione e danno:

$$d(y, v) = \begin{cases} 0 & \text{per } y \leq y_i \\ \frac{y - y_i}{y_c - y_i} & \text{per } y_i \leq y < y_c \\ 1 & \text{per } y_c \leq y \end{cases} \quad (4)$$

dove:

y è una stima dell'accelerazione del suolo empiricamente ricavata dall'intensità;

y_i è il valore di y corrispondente al verificarsi dell'inizio del danno;

y_c è il valore di y corrispondente al verificarsi del collasso dell'edificio;

v è il valore dell'indice di vulnerabilità;

d è il valore dell'indice di danno.

Per y_i e y_c si è ipotizzato un legame funzionale con l'indice di vulnerabilità del tipo:

$$y_i = \alpha_i \exp(-\beta_i v) \quad (5)$$

$$y_c = [\alpha_c + \beta_c v^\gamma]^{-1} \quad (6)$$

Sulla scorta dei dati di vulnerabilità e danno disponibili sono stati stimati i valori dei parametri α_i , β_i , α_c , β_c e γ ottenendo le relazioni tra danno, vulnerabilità e accelerazione rappresentate in figura 2.

Gli sviluppi descritti in questo lavoro partono dai risultati sopra descritti e cercano di superare alcuni limiti insiti nelle definizioni utilizzate per l'indice di vulnerabilità v e per l'indice di danno d .

Sezione 8 - ESTENSIONE E LIVELLO DEL DANNO									
Evento in data	³⁰¹ <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0</td><td>6</td><td>0</td><td>5</td><td>7</td><td>6</td></tr></table>	0	6	0	5	7	6	Estensione del danno	
0	6	0	5	7	6				
1 sisma	³⁰⁷ <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td></tr></table>	1	E ≤ 10 %	0					
1									
2 altro		10 < E ≤ 20 %	1						
		20 < E ≤ 30 %	2						
		30 < E ≤ 40 %	3						
		40 < E ≤ 50 %	4						
		50 < E ≤ 60 %	5						
		60 < E ≤ 70 %	6						
		70 < E ≤ 80 %	7						
		80 < E ≤ 90 %	8						
		E > 90 %	9						
Livello del danno									
Nessun danno	A								
Danno lieve	B								
Danno medio	C								
Danno grave	D								
Danno gravissimo	E								
Danno totale	F								
	1 si								
Danni impianti	2 no	³⁸⁸ <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td></td></tr></table>							

M	E	L	N°	M	E	L	N°		
308	E	3	D	2	328	E	5	D	3
312	E	6	E	2	332	E	5	D	1
316					336				
320					340				
324					344				
Strutture Verticali				Strutture Orizzontali					
M	E	L	N°	M	E	L	N°		
348	E	5	D	3	368	E	3	D	2
352	A	9	A	1	372	E	6	E	2
356					376				
360					380				
364					384				
Scale				Tamponature					

Figura 1. Parte della scheda GNDT per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici (Sezione 8). Sono riportati il massimo livello di danno osservato (M) ed il danno più frequente (L) con la sua estensione (E). Tale estensione è espressa su ogni piano dell'edificio in 10 intervalli percentuali codificati tra 0 e 9.

L'indice di vulnerabilità è definito in forma scalare e non consente di tenere conto delle differenze di risposta dell'edificio in funzione della direzione prevalente della sollecitazione; la direzionalità dell'azione sismica può avere una certa importanza quando si esaminano casi reali per stabilire correlazioni tra entità delle azioni e danni provocati.

Un limite ancora più importante è legato all'aver trascurato, nella definizione dell'indice di vulnerabilità, gli effetti dell'interazione tra l'edificio e le costruzioni adiacenti; in altri termini l'indice di vulnerabilità v rappresenta una specie di misura intrinseca riferita ad una condizione ideale dell'edificio, considerato isolato dal contesto: per tale motivo l'indice v sarà indicato nel seguito con il termine *vulnerabilità intrinseca*.

Il modo come è definito l'indice di danno lo rende insensibile alla localizzazione del danno stesso; in altri termini, un dato livello di danno ha lo stesso peso sia che si verifichi, ad esempio, al piano terra sia che sia stato rilevato all'ultimo piano dell'edificio. Una simile insensibilità non è ammissibile per molte applicazioni; la localizzazione del danno può avere influenza, ad esempio, sui giudizi di agibilità, sulla valutazione dei costi di intervento e sulla stima delle conseguenze per le persone.

Una terza limitazione, infine, deriva dalla relativa esiguità di dati disponibili per la calibrazione dei parametri della relazione tra danno, vulnerabilità ed entità delle azioni.

Per queste ragioni da qualche anno sono stati avviati studi per approfondire la definizione dell'indice di vulnerabilità e dell'indice di danno; si è cercato di allargare la base di dati recuperando informazioni

relative ai terremoti degli ultimi anni; infine, si è cercato di automatizzare il più possibile i procedimenti di analisi, ricorrendo all'uso integrato di sistemi esperti e di sistemi informativi territoriali.

Questi sviluppi formano l'argomento dei paragrafi successivi.

2. VULNERABILITA'

Negli studi di correlazione azione-vulnerabilità-danno è opportuno disporre di informazioni riguardanti l'anisotropia della risposta strutturale e considerare quindi la vulnerabilità come un'entità anisotropa. Limitandosi a valutare l'indice di vulnerabilità lungo due direzioni principali, si può in prima approssimazione rappresentare l'andamento complessivo della vulnerabilità al variare dell'orientamento con un'ellisse orientata avente gli assi proporzionali agli indici di vulnerabilità valutati per le due direzioni principali (Grimaz, 1993).

Nella valutazione dell'indice è necessario tener conto dell'anisotropia anche degli effetti locali e globali del contesto strutturale.

L'indice di vulnerabilità definito in (1) è rappresentativo della vulnerabilità dell'edificio pensato come estratto dal contesto strutturale e riferito alla direzione di maggiore danneggiabilità. Per tener conto del fatto che generalmente un edificio presenta una diversa danneggiabilità al variare della direzione di sollecitazione si può, in prima approssimazione, rappresentare l'andamento complessivo della vulnerabilità con un'ellisse orientata avente gli assi proporzionali agli indici di vulnerabilità, valutati sempre con la (1), per le due direzioni principali x e y (vedi figura 3).

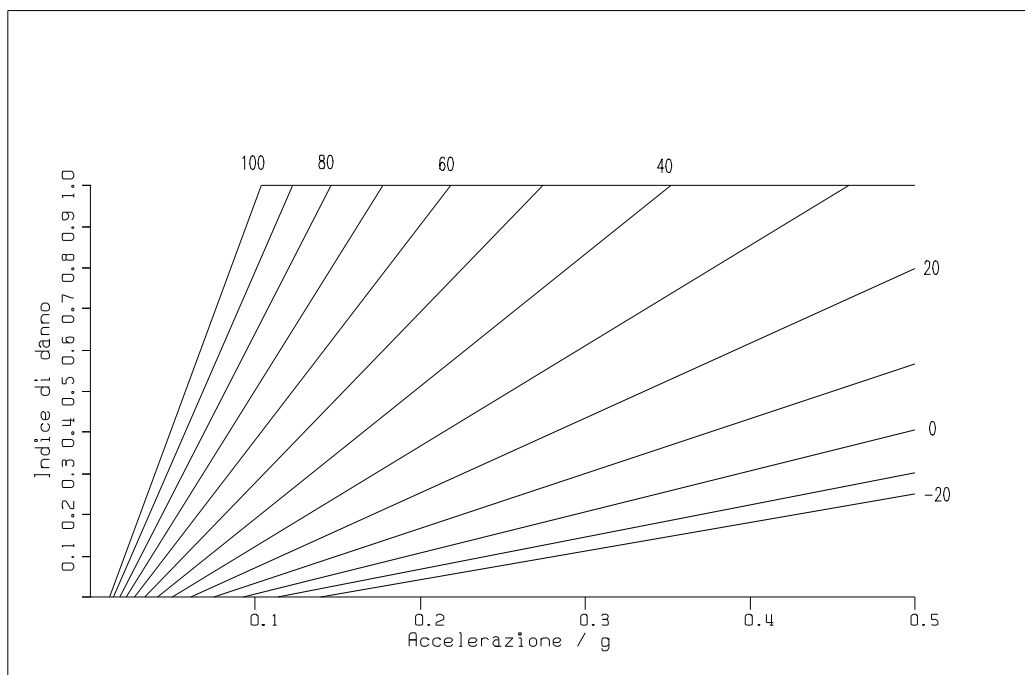


Figura 2. Relazione vulnerabilità-danno-accelerazione per edifici in muratura e cemento armato (Angeletti et al., 1988; Guagenti e Petrini, 1989).

Si definisce così un'ellisse di vulnerabilità intrinseca U che esprime la vulnerabilità dell'edificio pensato come isolato o estratto dal contesto strutturale al variare della direzione di sollecitazione. L'asse dell'ellisse nella direzione k viene determinato come:

$$U_k = S_i p_{ik} w_i \quad \text{per } k = x, y \quad (7)$$

Per tener conto dell'influenza del contesto strutturale, al fine di determinare la vulnerabilità effettiva dell'edificio, si individua una serie di fattori del contesto strutturale ai quali si imputa la modifica della danneggiabilità dell'edificio passando dalla condizione intrinseca a quella effettiva. L'ellisse di vulnerabilità effettiva V si ottiene quindi dalla deformazione dell'ellisse intrinseca per effetto della presenza di tali fattori di contesto f .

$$V = \beta \times U \quad (8)$$

dove β è detta funzione di deformazione ed è così definita (Grimaz, 1993):

$$b(b_x, b_y) = (I + \mathbf{cb}) = (I + S_j f_j) \quad (9)$$

Nel caso di edificio isolato, non attivandosi alcun fattore di contesto, si ha che la β assume il valore 1 e l'ellisse di vulnerabilità effettiva coincide con quella intrinseca.

Nel caso di edificio appartenente ad un aggregato strutturale, nel presente lavoro, si sono considerati come fattori di contesto o di deformazione i seguenti effetti:

- effetti locali di contesto strutturale (f_{cl})
- effetti globali di contesto strutturale (f_{cs})
- effetti dovuti a disomogeneità strutturale (f_{ds})

cosicchè la (9) assume la forma:

$$b(b_x, b_y) = (I + f_{cl} + f_{cs} + f_{ds}) \quad (10)$$

Il primo fattore f_{cl} è legato alle caratteristiche planivolumetriche dell'edificio e delle strutture limitrofe. La valutazione degli effetti è ricondotta alla definizione di indici di irregolarità di forma calcolati sulla base delle informazioni raccolte con le schede del GNDDT.

Il secondo fattore f_{cs} è correlato alla posizione che l'edificio assume nel contesto strutturale e tiene conto forfetariamente della modifica dei meccanismi di parete e degli effetti dinamici di amplificazione o riduzione delle deformazioni rispetto alla condizione intrinseca.

La valutazione di sintesi di tali effetti sull'edificio viene ricondotta alla definizione di una casistica di condizioni morfologico-strutturali di contesto; si definiscono cioè le procedure per individuare le posizioni del generico edificio nell'aggregato. Ad ogni posizione viene poi associato un punteggio percentuale migliorativo o peggiorativo dovuto all'influenza del contesto strutturale. Il terzo fattore f_{ds} tiene conto degli effetti dinamici di interazione causati da forti differenze nelle caratteristiche dinamiche, di materiale o dalla presenza di discontinuità strutturali. Anche tale fattore è ricavabile direttamente dalle informazioni raccolte con le schede del GNDDT.

Il problema si pone invece in termini più impegnativi nell'assegnazione delle posizioni, dove, la fonte di informazione delle schede deve essere integrata con una planimetria dell'ambito urbano. Correlando le informazioni alfanumeriche con quelle grafiche si perviene alla ricostruzione di un planivolumetrico sul quale si vanno poi a individuare le posizioni.

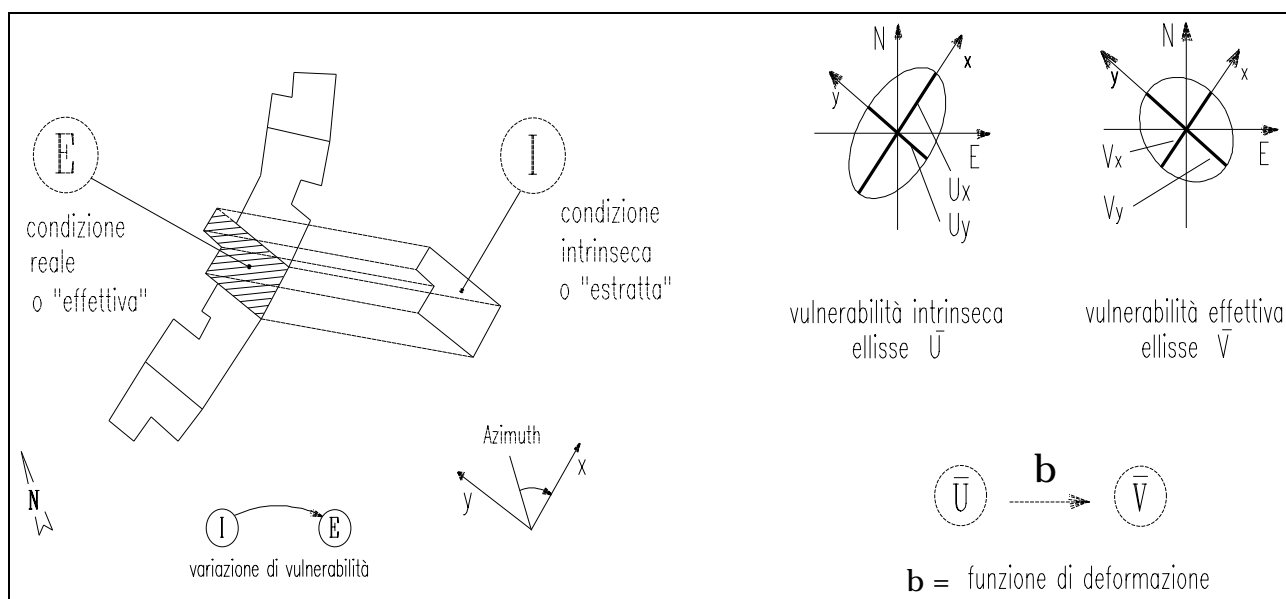


Figura 3. Vulnerabilità intrinseca ed effettiva.

3. DANNO

Nell'ambito degli studi di rischio sismico, la previsione del danno dovrebbe permettere la definizione di un quadro generale degli effetti attesi sotto più punti di vista. La stima di un indice di danno atteso, dovrebbe cioè permettere di risalire sia alle caratteristiche di danneggiamento fisico dell'edificio che alle condizioni di ripristinabilità, agibilità e di possibile perdita di vite umane in modo da essere adatto anche per valutazioni legate alla pianificazione e alla gestione dell'emergenza post-sisma.

3.1 - Scala dei Giudizi Sintetici di Danno (GSD)

Un criterio di assegnazione della misura del danno alternativo a quello proposto in (3), è stato ricavato con riferimento a quanto proposto in (Casolo, Grimaz e Petri, 1993) e segue una procedura congruente con quella introdotta per la scala macrosismica EMS 1992 (Grunthal, 1993), ma specificamente sviluppata per edifici in muratura. La valutazione quantitativa del danno è stata operata attraverso una lettura del dissesto orientata alla stima della compromissione della funzionalità strutturale dell'edificio. Tale funzionalità viene distinta in due componenti, quella primaria (strutture verticali, orizzontamenti, copertura e fondazioni) e quella secondaria (tamponamenti, comignoli, intonaco e manto di copertura). Sono definiti sei gradi di danneggiamento, ad ognuno dei quali si associa uno scenario di dissesto dell'edificio. Successivamente, attraverso l'osservazione di elementi ausiliari quali la ripristinabilità, l'agibilità e la probabilità di vittime si perviene ad un giudizio sintetico di danno e ad un indice numerico. Tale indice GSD permette di associare al danno fisico anche una valutazione di massima del danno economico e sociale, nonché aspetti che riguardano la gestione dell'emergenza post-sisma. Per i dettagli della definizione della scala di danno GSD si veda (Grimaz et al., 1996).

4. STRUMENTI SOFTWARE

L'idea alla base della struttura software realizzata è quella di usare un sistema esperto per codificare le procedure di valutazione della vulnerabilità e del danno sulla base delle informazioni cartografico-tabellari immagazzinate all'interno del GIS e di sfruttare le capacità di analisi delle relazioni geometrico-spaziali sulle entità immagazzinate nel GIS. Dal punto di vista implementativo si sono adottati degli strumenti software ampiamente diffusi: il GIS *Arc/Info* (ESRI Inc.) e la shell per lo sviluppo di sistemi esperti *Nexpert Object* (Neuron Data Inc.); l'ambiente su cui sono stati sviluppati i prototipi è il sistema operativo *MsDOS*, ma nulla ne limita il porting verso ambienti più completi (*Unix*). Interessante, infatti, è la completa portabilità delle basi di conoscenza e delle coverage geografiche realizzate su altre piattaforme su cui sono disponibili gli strumenti software adottati. In questo modo Nexpert

lavora come un server di *Arc/Info* fornendo il modulo di ragionamento che implementa le valutazioni degli indici di vulnerabilità e di danno, altrimenti difficilmente realizzabili all'interno del GIS. La comunicazione avviene attraverso la condivisione di dati (in formato *dBASE*) della scheda di vulnerabilità, relazionata alla topologia poligonale di *Arc/Info* e direttamente accessibile da Nexpert.

4.1 Il sistema esperto per la valutazione della vulnerabilità effettiva

In sintesi il processo automatico per la valutazione della vulnerabilità effettiva è il seguente:

- acquisizione ed organizzazione delle informazioni grafiche ed alfanumeriche (i dati ingegneristico-strutturali in *dBASE*, la mappa degli edifici in formato *Autocad DXF*);
- creazione delle coverages topologiche mediante il GIS *Arc/Info*;
- individuazione degli aggregati con andamento in pianta regolare ed irregolare;
- individuazione delle interruzioni all'interno degli aggregati regolari;
- localizzazione della posizione relativa di ogni edificio e della topologia dell'aggregato a cui appartiene;
- valutazione delle regole per l'assegnazione delle posizioni degli edifici, tramite una base di conoscenza implementata in Nexpert;
- valutazione della vulnerabilità effettiva utilizzando una seconda base di conoscenza;
- visualizzazione della mappa del comune; tracciamento delle ellissi di vulnerabilità per ogni edificio e/o mappatura dei valori di vulnerabilità sulle piante degli edifici, utilizzando le primitive grafiche di *Arc/Info*.

Per un'analisi di dettaglio dell'implementazione dal punto di vista informatico, si rimanda a (Cella, 1994 e 1995).

4.2 Il sistema esperto per la stima del danno

Anche in questa applicazione il modulo inferenziale realizzato con la shell Nexpert compie una valutazione dell'indice di danno applicando la scala GSD direttamente sulle informazioni tabellari memorizzate nel database di *Arc/Info*. I dati utilizzati sono quelli relativi alla sezione 8 (*estensione e livello del danno*) della scheda GNDT (figura 1). Anche qui, la comunicazione avviene attraverso la condivisione dei dati della scheda di vulnerabilità, relazionata alla topologia poligonale di *Arc/Info* e direttamente accessibile da Nexpert.

Adottando lo schema implementativo dei moduli inferenziali di Nexpert, ogni record estratto dal database

viene associato ad un oggetto linkato ad una classe opportunamente realizzata all'interno della struttura ad oggetti della base di conoscenza. Da tale classe vengono ereditati i metodi per il calcolo dei parametri con cui sono valutati gli stati di danno delle componenti strutturali dell'edificio in esame.

In sintesi il processo automatico (Grimaz, 1996) per la valutazione del danno subito dagli edifici secondo la scala di danno GSD è il seguente:

- valutazione di un primo set di regole per la stima del danno subito dall'edificio secondo le varie chiavi di lettura del dissesto della scala GSD; e cioè:
 1. valutazione quantitativa delle *lesioni alle strutture verticali* subite dall'edificio;
 2. valutazione della *distribuzione del danno* sull'edificio (rispetto all'altezza);
 3. valutazione di un *indice di danno medio*, ricavato da una revisione dell'indice proposto in (2);
 4. valutazione quantitativa delle *lesioni alle strutture orizzontali* subite dall'edificio;
 5. valutazione quantitativa delle *lesioni della copertura* dell'edificio;
 6. valutazione della *ripristinabilità* dell'edificio;
 7. valutazione dell'*agibilità* dell'edificio;
 8. valutazione della *probabilità di vittime interne* all'edificio;
 9. valutazione della *probabilità di vittime esterne* all'edificio;
- valutazione di un secondo set di regole per l'assegnazione di un grado di danno globale dell'edificio, ottenuto combinando i risultati ottenuti al passo precedente secondo le definizioni dei gradi della scala GSD (Grimaz, 1996);
- visualizzazione della mappa del comune con la campitura cromatica delle conclusioni raggiunte dalle varie chiavi di lettura del dissesto della scala GSD e dell'indice globale di danno;
- visualizzazione per singoli edifici dei risultati espressi tramite grafici a barre orizzontali, ove ogni riga del grafico riporta la conclusione raggiunta per ogni interpretazione del danno oltre all'indice di danno globale;
- visualizzazione per singoli edifici dei risultati contenuti nei grafici in forma di report sintattico in linguaggio naturale e del valore del grado di danno globale.

5. DATI DISPONIBILI

I dati utilizzati in questo lavoro per stimare i parametri della relazione danno - vulnerabilità - azione sismica, riguardano gli edifici in muratura dei centri storici dei comuni di Venzone (Ud) [intensità IX MCS], Tarcento (Ud) e San Daniele (Ud) [intensità VIII MCS] rilevati dopo il terremoto del 6 maggio 1976. Questi dati hanno

permesso, edificio per edificio, una valutazione della vulnerabilità e del danno subito a seguito dell'evento sismico. A questo primo insieme di dati sono stati aggiunti dei valori vulnerabilità/danno provenienti dal terremoto del Parco D'Abruzzo del 1984 [intensità VII MCS] e già utilizzati in precedenti lavori (Guagenti e Petrini, 1989).

I dati disponibili sui vari siti sono di varia tipologia e in formati eterogenei.

- Venzone: documentazione fotografica di 98 edifici riguardanti il centro storico della cittadina, rilevata dopo l'evento del maggio 1976. Sulla base di questa ricca collezione di immagini sono state redatte le schede di vulnerabilità GNDT.
- San Daniele (55 edifici) e Tarcento (83 edifici): banca dati Fr.E.D. (Friuli Earthquake Damage database) costruita sulla base dei verbali di accertamento danni di cui alla L.R. F.V.G. 17/76 da parte del gruppo di ricerca operante presso il Dipartimento di Georisorse e Territorio dell'Università di Udine in collaborazione con il GNDT.
- Barrea: schede di vulnerabilità GNDT di 116 edifici.

Il processo di omogeneizzazione fra i primi due set di dati è stato eseguito con l'ausilio di considerazioni di carattere strutturale (si veda il lavoro di tesi di Mallardo, 1992).

6. RISULTATI

Il set di dati descritto nel paragrafo precedente ha reso disponibile un insieme 352 edifici su cui sono stati valutati gli indici di vulnerabilità e di danno, utilizzando gli strumenti descritti nel paragrafo 4.

Tramite un processo di minimizzazione, usando la tecnica dei minimi quadrati, sono stati calcolati i parametri delle formule (5) e (6) e quindi ricavata la relazione $d(y, V)$.

I valori dei parametri α_i , β_i , α_c , β_c e γ calcolati sono espressi in tabella seguente:

α_i	β_i	α_c	β_c	γ
0.08	0.013037	1.5371	0.00097401	1.8087

Tabella 1: Parametri calcolati per le relazioni (5) e (6).

Nel calcolo della relazione $d(y, V)$, si è assunto un legame tra accelerazione del suolo y e valori di intensità macrosismica I , ricavato empiricamente da (Guagenti e Petrini, 1989) del tipo:

$$\ln y = a I + b$$

con:

$$a = 0.602, \quad b = 7.073.$$

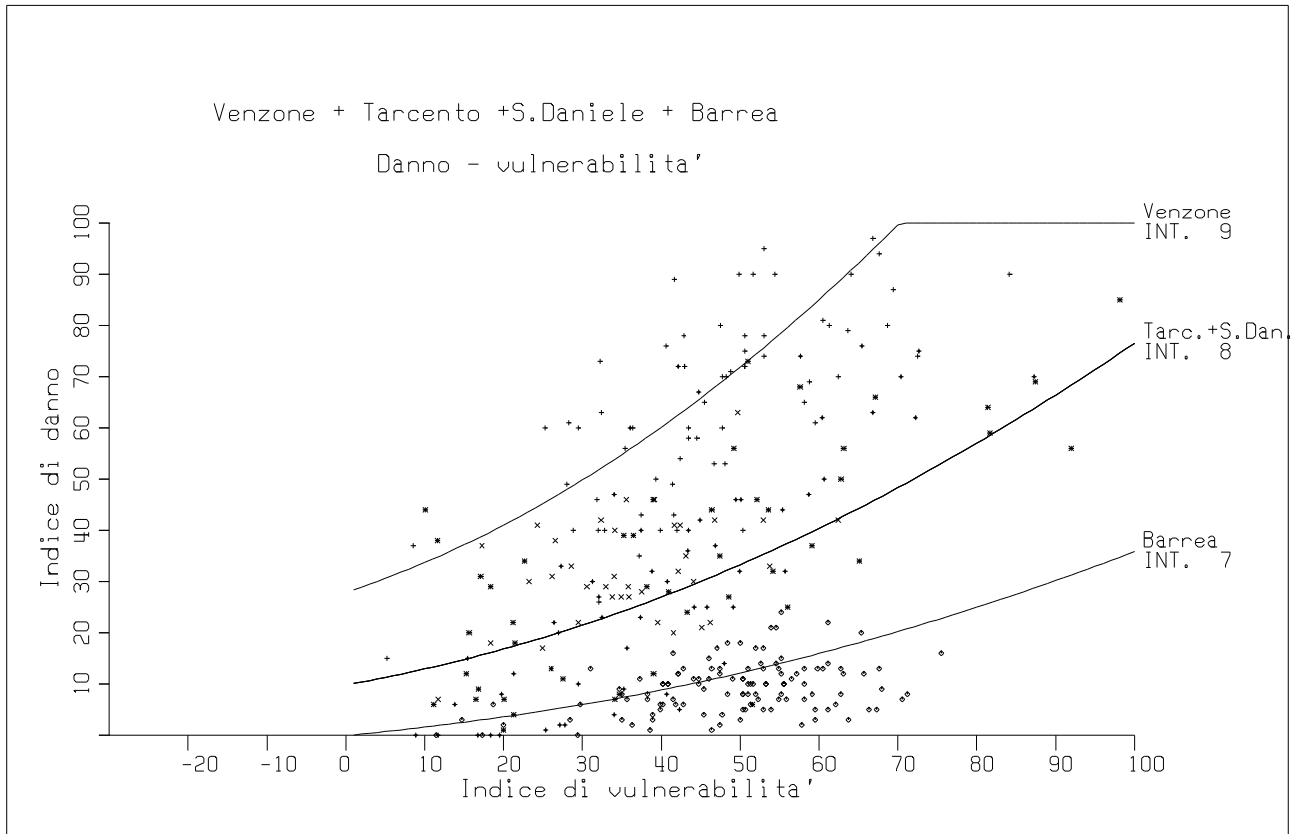


Figura 4. Studio della correlazione tra vulnerabilità e danno per edifici suddivisi in tre insiemi in funzione dell'intensità macrosismica registrata: Venzone, (intensità IX); Tarcento e San Daniele (intensità VIII); Barrea (intensità VII).

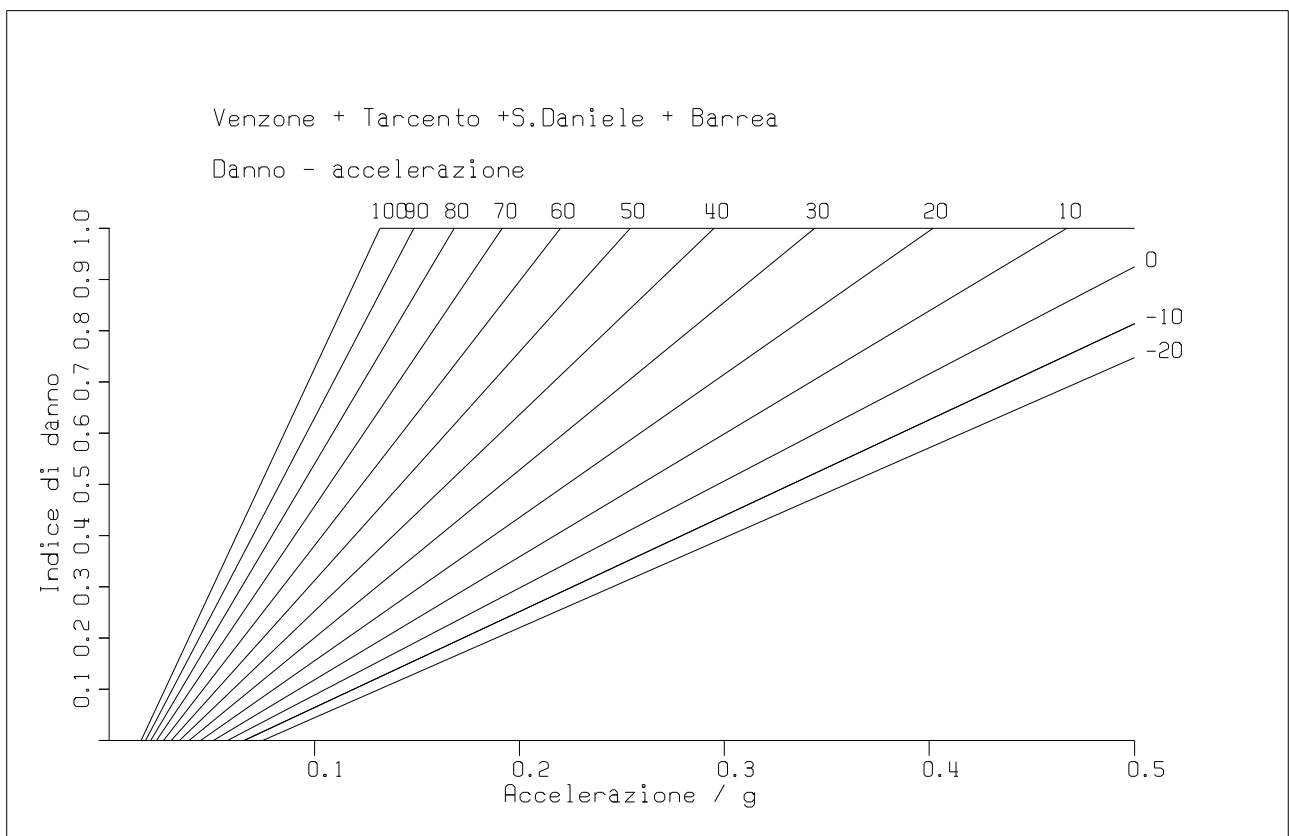


Figura 5. Relazione vulnerabilità - danno - accelerazione con parametri stimati sui dati dei comuni di Venzone, Tarcento, San Daniele e Barrea.

In fase di calcolo delle correlazioni il range di vulnerabilità è stato allargato, considerando valori negativi, al di sotto del range usuale ($V=0-100$), così da includere strutture meglio costruite rispetto alla normativa sismica per edifici in muratura.

Lo studio della correlazione tra vulnerabilità, danno ed accelerazione mostra che l'indice di vulnerabilità effettiva è sufficientemente correlato all'indice di danno GSD (vedi figura 4). La disponibilità dei dati collezionati dopo recenti terremoti con differenti intensità macrosismiche (dal grado VII al grado IX MCS) e l'uso dei nuovi indici di vulnerabilità e danno, permette di migliorare la correlazione rispetto a quanto ottenuto in precedenti studi (Guagenti e Petrini, 1989).

- ◆ La disponibilità dei dati relativi ai comuni di Tarcento e San Daniele, per siti che hanno registrato una intensità macrosismica pari a VIII MCS, ha permesso di ampliare il set di dati precedentemente utilizzato (Guagenti e Petrini, 1989) sui quali condurre le elaborazioni di taratura delle relazioni vulnerabilità / danno.
- ◆ L'uso dei nuovi indici di vulnerabilità e di danno ha portato a un miglioramento delle correlazioni vulnerabilità-danno rispetto a quanto ricavato in precedenti lavori (Guagenti e Petrini, 1989 e Meroni et al., 1995).
- ◆ Il grafico (figura 4) che relaziona l'indice di vulnerabilità all'indice di danno mostra come la curva relativa all'intensità $I = VIII$ si colloca in una posizione mediana equidistante rispetto alle curve relative all'intensità $I = VII$ e $I = IX$ estrapolate.
- ◆ Il grafico (figura 5) che relaziona l'accelerazione all'indice di danno evidenzia, per edifici in muratura costruiti secondo la normativa sismica (con indice di vulnerabilità $V=0$), una accelerazione di collasso pari a circa $y_c = 0.5 g$.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Angeletti P. (1984), *Un modello per la valutazione dei costi di riparazione e adeguamento sulla base dei censimenti di danno e vulnerabilità*, Atti seminario internazionale "Vulnerabilità ai terremoti e metodi per la riduzione del rischio sismico", Noto.

Angeletti P., Bellina A., Guagenti E., Moretti A., Petrini V. (1988), *Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results*, Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, 8, 181-186, Tokyo.

Angeletti P., Gavarini C. (1984), *Un metodo di valutazione della vulnerabilità sismica per edifici esistenti di cemento armato. Confronti sperimentali*, Atti del II Convegno Nazionale sulla Ingegneria Sismica in Italia - Rapallo.

Benedetti D., Petrini V. (1984), *On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure*, L'industria delle Costruzioni; 18, 66-78.

Braga F., Dolce M., Liberatore D. (1982), *A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK/76 scale*, Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, 7, 431-450, Athens.

Braga F., Liberatore D., Dolce M., (1984), *Fast and reliable damage estimations for optimal relief operations*, Proceedings Int. Symp. on Earthquake Relief in Less Industrialized Areas, 145-151, Zurich.

Casolo S., Grimaz S., Petrini V. (1993), *Scala dei Giudizi sintetici di stima del danno sismico. Scala G.S.D.e.m. 93*. Internal Report, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine.

Cella F., Grimaz S., Meroni F., Petrini V., Tomasoni R., Zonno G. (1994), *A case study for seismic vulnerability assessment using GIS connected to Expert System*, Proceedings of the 9th Arc/Info European User Conference - Paris - France, October 5th - 7th, 421-448, Parigi.

Cella F., Grimaz S., Meroni F., Petrini V., Tomasoni R., Zonno G. (1995), *An application on Geographic Information System connected to Expert System*, Cahiers du Centre de Géodynamique et de Séismologie, 9, 105-128, Luxembourg.

Grimaz S. (1993), *Valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura, appartenenti ad aggregati strutturali, sulla base di analisi a posteriori*, Ingegneria Sismica, Patron Editore, 3/93, 12 - 22, Bologna.

Grimaz S., Meroni F., Petrini V., Ranù G., Tomasoni R., Zonno G. (1996), *Expert system for damage assessment of buildings in seismic areas*, Cahiers du Centre de Géodynamique et de Séismologie, 12, 83-103, Luxembourg.

Grunthal G. ed. (1993), *European Macroseismic Scale 1992*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 7, Luxembourg.

Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - CNR (1994), *Scheda di esposizione e vulnerabilità di primo livello e di rilevamento danni*, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Roma.

Guagenti E., Petrini V. (1989), *Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità*, Proceedings of the 4th Italian National Conference on Earthquake Engineering, - Milan - (Italy), 1, 145-153, Milano.

Mallardo R. (1992-93), *Analisi comparativa di significatività dei parametri caratterizzanti la vulnerabilità sismica di edifici in muratura sulla base dei danni del terremoto del 1976 in Friuli*, Tesi di laurea - Dipartimento di Georisorse e Territorio - Università di Udine, a.a. 1992-93, Udine.

Meroni F., Tomasoni R., Grimaz S., Petrini V., Zonno G., Cella F. (1995), *Assessment of seismic effective vulnerability using Arc/Info connected to Nexpert*, Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation - Nice - France, October 17th - 19th, 1995, 1, 68-75, Parigi.