

## 2. VULNUS: CALIBRAZIONE E IMPOSTAZIONE DELLA NUOVA BASE DI DATI ORACLE

*Alberto Bernardini*

**Abstract:** VULNUS is a computer based procedure for seismic vulnerability assessment of masonry buildings both isolated and grouped in complex nuclei of interacting constructions. The methodology is based on the evaluation of critical values of the mean acceleration response corresponding to in-plane and out-of-plane collapse mechanisms of the wall systems or of each wall restrained by the floor slabs and transverse walls. They are combined through a knowledge based fuzzy vulnerability model with other qualitative information on buildings and soil characteristics to derive a linguistic judgement on (or corresponding upper and lower bound of) the probability of collapse or heavy damage of the single building or of a population of buildings. The paper briefly presents the methodology and summarises some researches devoted to compare the forecasted vulnerability with the damages observed on models after shaking table tests and on buildings struck by the 1997 Umbria-Marche earthquake. Moreover the paper describes a new buildings relational database designed to record in a rational structure both data required as input to VULNUS procedure and data on damage description and vulnerability factors collected with the survey forms used in Italy. It is expected that the database will be very useful for future calibration of the procedure.

### 2.1 Premessa

VULNUS è una procedura per valutazioni di vulnerabilità sismica di edifici in muratura isolati o collegati in nuclei complessi interagenti, sviluppata a partire dalla seconda metà degli anni '80 presso l'Università di Padova, Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni (dal 1996: Dipartimento di Costruzioni e Trasporti) (Bernardini, Gori & Modena 1990). Essa è basata su valutazioni del livello critico di accelerazione orizzontale media applicata all'edificio, corrispondente all'attivazione di meccanismi di collasso fuori del piano delle singole pareti (vincolate ai solai e alle pareti ortogonali) e nel piano dei due sistemi di pareti parallele o quasi-parallele accoppiate rigidamente dai solai.

Nella presente relazione, dopo aver brevemente riassunto le ipotesi di base e le caratteristiche principali della procedura, si descrivono le attività di ricerca svolte dalla UR di Padova nell'ambito dei PE96, 97 e 98 del GNDT orientate ai due seguenti obiettivi:

- comparare le previsioni di probabilità di collasso fornite da VULNUS con i danneggiamento osservati su edifici in muratura, in particolare utilizzando rilievi su edifici colpiti dal terremoto di Umbria-Marche, 1997; sono inoltre utilizzati risultati sperimentali di prove eseguite da altri autori su modelli in scala ridotta di edifici in muratura sollecitati fino a rottura su tavola vibrante;

- costruire una base di dati degli edifici in muratura che coordini in modo razionale le informazioni necessarie per VULNUS con le informazioni tipicamente raccolte con le schede di rilievo del danno e dei fattori di vulnerabilità degli edifici ordinari; in particolare si tratta delle schede GNDT di primo e secondo livello, e della scheda AeDES proposta nel 1997 dal Gruppo di Lavoro GNDT-SSN, nella versione 02/2000.

Nell'Allegato A le ipotesi di base della procedura, i meccanismi di collasso assunti per le pareti, il modello deterministico di vulnerabilità assunto ed i metodi per tener conto dell'incertezza (basati sulla teoria dei *random and fuzzy sets*) sono descritti in maggior dettaglio. Sono riportate inoltre istruzioni per l'installazione del programma di calcolo VULNUS (Versione 09/99).

Nell'Allegato B sono riportati i listati delle istruzioni in linguaggio QBASIC del programma principale *menu4q.bas* e delle 13 *sub-routines* della procedura per l'acquisizione ed elaborazione dei dati.

Nell'Allegato C sono contenuti i corrispondenti codici eseguibili del programma principale *menu4q.exe* e delle *sub-routines* richiamate.

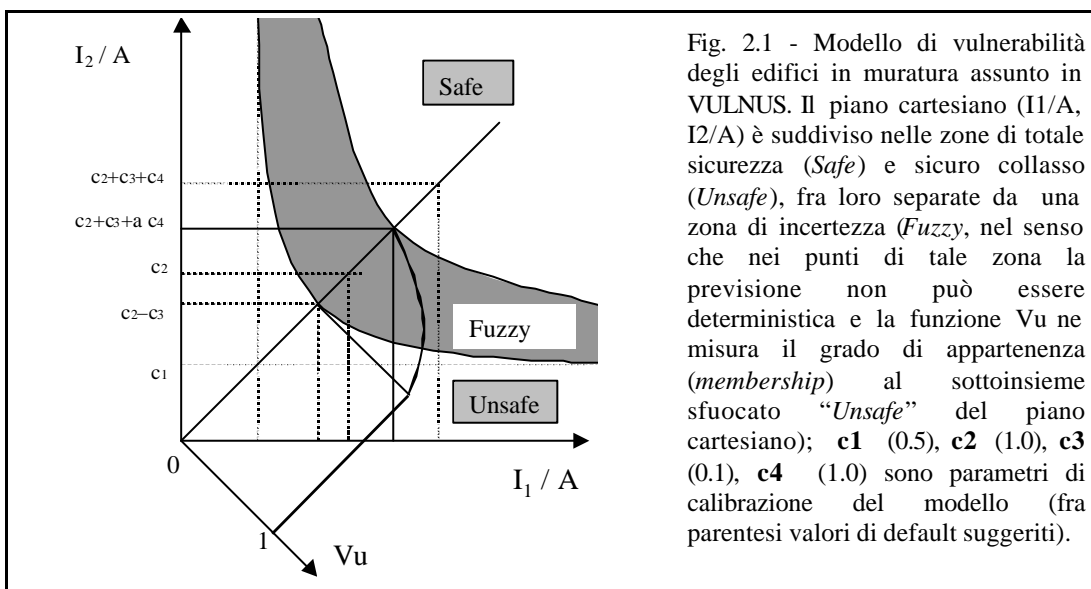


Fig. 2.1 - Modello di vulnerabilità degli edifici in muratura assunto in VULNUS. Il piano cartesiano ( $I_1/A$ ,  $I_2/A$ ) è suddiviso nelle zone di totale sicurezza (*Safe*) e sicuro collasso (*Unsafe*), fra loro separate da una zona di incertezza (*Fuzzy*, nel senso che nei punti di tale zona la previsione non può essere deterministica e la funzione  $V_u$  ne misura il grado di appartenenza (*membership*) al sottoinsieme sfuocato "Unsafe" del piano cartesiano);  $c_1$  (0.5),  $c_2$  (1.0),  $c_3$  (0.1),  $c_4$  (1.0) sono parametri di calibrazione del modello (fra parentesi valori di default suggeriti).

## 2.2 Vulnus

La procedura VULNUS è basata su un modello di vulnerabilità degli edifici in muratura dipendente dai seguenti parametri:

- **I1**: rapporto della resistenza al taglio nel piano medio del sistema di pareti (accoppiate in modo rigido dai solai) al peso totale dell'edificio; corrisponde al rapporto fra la accelerazione critica media di risposta al collasso per rottura a taglio e l'accelerazione di gravità; vengono separatamente considerati i due

- sistemi di pareti parallele alle direzioni principali dell'edificio, soggette a compressione verticale uniforme; le pareti di edifici adiacenti contribuiscono alla resistenza di entrambi gli edifici in proporzione al numero di piani;
- **I2**: rapporto fra accelerazione media di risposta al collasso per meccanismo di ribaltamento o rottura flessionale fuori del piano della parete esterna dell'edificio in condizioni più critiche e l'accelerazione di gravità; l'assunzione delle sole pareti esterne nell'analisi è in accordo con le osservazioni empiriche sul danneggiamento degli edifici colpiti da sisma e costituisce una modifica rispetto alla metodologia originaria (Bernardini, Gori & Modena 1990); sono valutate e sommate, tramite meccanismi al limite di collasso, le resistenze dei pannelli verticali di muratura, vincolati ai solai tramite forze di confinamento di entità prefissata, e quelle dei pannelli orizzontali, vincolati ai muri trasversali nelle zone nodali; nel caso di gruppi di edifici facenti parte di aggregati edilizi complessi, viene opportunamente valutato il contributo stabilizzante degli edifici adiacenti;
  - **I3**: somma pesata dei punteggi di 7 fattori parziali di vulnerabilità normalizzata fra 0 (edificio a regola d'arte o costruito in accordo con normative anti-sismiche) ed 1; questo parametro richiama l'indice di vulnerabilità definito in (Benedetti & Petrini 1984), peraltro scartando i parametri che implicitamente sono qui valutati tramite i precedenti due parametri;
  - **A**: rapporto fra valor medio (sulle masse dell'edificio) della accelerazione assoluta di risposta alla eccitazione sismica e l'accelerazione di gravità;
  - **a** = f(I3): fattore di incertezza, dipendente tramite una *fuzzy relation* da I3; tale parametro influenza particolarmente la larghezza della zona Fuzzy (Fig. 1);
  - **Vu** = f(I1, I2, A, a): probabilità di collasso ovvero danno superiore al livello D4 (definito in European Macro-seismic Scale, Grunthal 1998); tale funzione è schematicamente indicata in Figura 1. L'analisi può essere eseguita per un edificio (Vu) o per un gruppo di edifici (Vg).

Tenendo conto dei giudizi espressi in sede di rilievo dell'edificio sulla qualità delle informazioni raccolte, i parametri I1, I2 ed I3 sono misurati da sotto-insiemi sfuocati del loro intervallo di definizione.

Pertanto, utilizzando operativamente il *Principio di estensione* della teoria degli Insiemi Sfuocati, possono essere calcolati sotto-insiemi sfuocati dell'intervallo [0, 1] che misurano le probabilità di collasso Vu o Vg.

Da questi possono essere calcolati limiti superiori (*lower bounds*  $F_{LOW}$ ), inferiori (*upper bounds*  $F_{UPP}$ ) e valori centrali (*white probabilities*  $F_{WHP}$ ) della funzione di probabilità cumulativa ( $F(Vu)$  o  $F(Vg)$ ), come pure dei corrispondenti valori di Aspettazione ( $E[Vu]$  o  $E[Vg]$ ), in accordo alla Teoria dei Random Sets (Bernardini, 1995).

Risultati di sperimentazione dinamica su tavola vibrante di modelli di edifici in muratura (Benedetti, Carydis & Pezzoli, 1998) mostrano che nello stato di avanzato danneggiamento precedente al collasso  $A$  è circa coincidente con il valore della accelerazione di picco del moto di eccitazione (PGA) (Bernardini 1999).

## 2.3 La base di dati Oracle e l'interfaccia a VULNUS

La base di dati descritta nel seguito, oltre a contenere tutti i dati necessari di input alla metodologia VULNUS, raccolte nella:

- S1- Scheda ISTC-GNDT UR Padova- Versione 1999-05-11, contiene le informazioni relative alle seguenti schede:
- S2- Scheda GNDT di primo livello – Versione 1986.
- S3- Scheda GNDT di secondo livello per gli edifici in muratura – Versione 1986.
- S4- Scheda SSN-GNDT di primo livello di valutazione danno, pronto intervento e agibilità per gli edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (*AeDES 02/2000*).

### 2.3.1 Glossario dei termini principali

**AGGREGATO STRUTTURALE:** è un insieme di elementi strutturali, anche non omogenei che possono interagire sotto un'azione sismica o dinamica in genere.

Un aggregato strutturale, quindi, può essere costituito da *uno o più edifici* accorpati, precisando che l'accorpamento deriva da un contatto o un collegamento più o meno efficace tra edifici con caratteristiche costruttive generalmente diverse; la presenza di un giunto di separazione, ove ritenuto efficace ai fini sismici, dà luogo all'individuazione di due aggregati strutturali ben distinti.

**EDIFICIO:** all'interno degli aggregati strutturali si individuano gli edifici definiti come unità omogenee e, in genere distinguibili dagli edifici adiacenti per tipologia costruttiva, differenza di altezza, età di costruzione, sfalsamento dei piani. Nel caso di difficoltà nell'individuazione dell'edificio, all'interno di un aggregato strutturale, si consiglia di riempire un'unica scheda per l'intero aggregato strutturale.

La base di dati è particolarmente sviluppata per gli edifici tradizionali in muratura. Per gli edifici di altra tipologia, in particolare di c.a., è prevista solo una descrizione di primo livello.

Dal punto di vista dell'interazione col terreno si distinguono:

- piani totalmente interrati (altezza media fuori terra  $h_{ft} < h/3$ );
- piani parzialmente interrati ( $1/3h \leq h_{ft} \leq 2/3h$ );
- piani fuori terra (altezza media fuori terra  $h_{ft} > 2/3 h$ ).

L'altezza massima fuori terra di un edificio è la somma delle altezze dei piani fuori terra o parzialmente interrati. L'altezza minima fuori terra di un edificio è la somma delle altezze dei piani fuori terra. L'altezza totale di un edificio è la somma delle altezze di tutti i piani.

**GRUPPO DI PIANI:** Un edificio è suddiviso generalmente in piani non sfalsati (o con piccoli sfalsamenti, ad esempio minori di un quinto dell'altezza interpiano), caratterizzati da una pianta, da una certa altezza di interpiano  $h$  e da determinate tipologie strutturali per quanto riguarda le pareti, il solaio di copertura e le scale. Il *solaio di copertura* di un piano coincide con il *solaio di calpestio* del piano successivo. Non si considerano quindi, agli effetti della descrizione geometrica

dell'edificio, controsoffitti leggeri non praticabili. In particolare, il solaio di calpestio del piano terra è per definizione direttamente (o tramite un vespaio) appoggiato al terreno. Inoltre, il solaio di copertura del piano superiore ha sempre caratteristiche particolari e coincide con la *copertura* dell'edificio. Se la copertura è a falde inclinate, l'altezza dell'ultimo piano corrisponde all'altezza media *di gronda*. Rispetto a tale livello, l'altezza della copertura corrisponde all'altezza media del volume racchiuso dalla copertura.

I piani di un edificio che risultano:

- consecutivi tra di loro,
- aventi la stessa distribuzione delle pareti in pianta e quindi la stessa superficie coperta,
- aventi la stessa altezza,
- omogenei per quanto riguarda l'adiacenza con altri edifici e l'interazione col terreno,
- omogenei per quanto riguarda la tipologia strutturale delle scale, delle pareti e dei solai di copertura, con la sola eventuale eccezione dell'ultimo piano,

costituiscono un *gruppo di piani*. Pertanto, in particolare, per un determinato gruppo di piani si individua una sola tipologia strutturale per quanto riguarda le pareti, le scale, il solaio di copertura. Si considerano esplicitamente solo i solai di copertura, in quanto i solai di calpestio restano impliciti. La copertura viene associata all'edificio.

### 2.3.2 Misure sfuocate

Per tenere conto sia dell'incertezza nelle stime di alcune dimensioni non misurabili direttamente, come ad esempio la profondità della fondazione, sia della variabilità di parametri fisici, come ad esempio la resistenza dei materiali, sia dell'imprecisione del processo di misurazione, si introduce l'utilizzo di valori incerti, sotto forma di misure o variabili sfuocate (*fuzzy*).

In particolare è opportuno introdurre quattro tipi distinti di variabili fuzzy:

a) FUZZY NUMBER (FUZZYN( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ )): sono fuzzy set trapezoidali per una variabile che può assumere un numero indefinito di valori; è definita da una quartupla ordinata di valori numerici crescenti della variabile stessa: il primo ed il quarto con grado di appartenenza (*membership*) 0, il secondo e terzo con appartenenza 1. In questo modo si esprime il fatto che la misura è sicuramente compresa nell'intervallo  $[x_1, x_4]$  e che l'intervallo di valori più plausibili è  $[x_2, x_3]$ .

b) FUZZY SET (FUZZYS $k$ ): sono fuzzy sets arbitrari per una variabile che può assumere un numero  $k$  finito (prefissato e piuttosto piccolo, ad esempio da 2 a 8) di valori numerici (esempio: 1, 2, 3, 4) o linguistici (esempio: leggero, medio, pesante); è definita da  $k$  valori (ciascuno compreso fra 0 e 1) di appartenenza. La codifica di questi fuzzy sets può essere fatta in modo estremamente compatto, discretizzando il grado di appartenenza in modo che possa assumere solo 5 valori (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0).

c) FUZZY VARIABLE FV ( $k, x_1, x_2, x_3, x_4$ ). La codifica più generale di un dato incerto con una possibile descrizione sia qualitativa sia quantitativa può avvenire con una stringa di  $k$  caratteri e 4 valori numerici.

d) FUZZY RELATION (bidimensionale). Può consentire di descrivere correlazioni incerte fra due variabili. Il caso più interessante è quello della descrizione del livello ed estensione del danno, tramite 6 fuzzy numbers che misurano l'estensione dei sei livelli di danno EMS98.

Esempio:  $E(D_0) = (50, 60, 100, 100)$   
 $E(D_1) = (10, 20, 30, 40)$   
 $E(D_2) = (0, 10, 20, 20)$   
 $E(D_3) = E(D_4) = E(D_5) = (0, 0, 0, 0)$

### 2.3.3 Diagramma ER

Lo schema della base di dati può essere molto sinteticamente rappresentato dal diagramma ER (*Entity-Relationship*) di Figura 2.2. I singoli oggetti sono descritti da una o più tabelle (gerarchicamente collegate a quella principale).

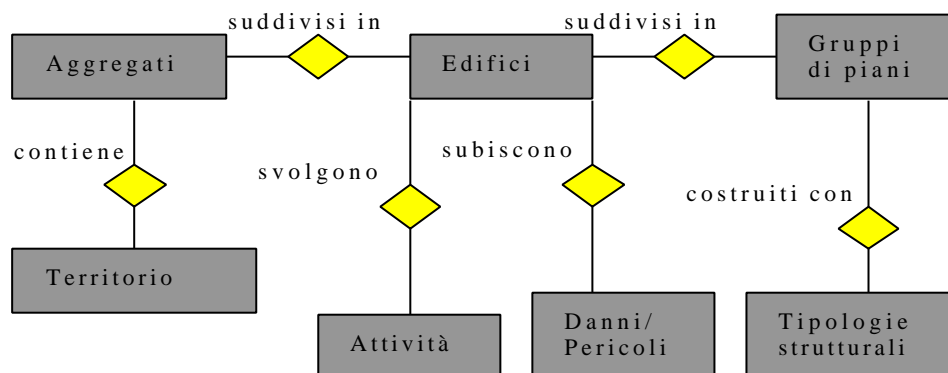


Fig. 2.2 – Diagramma ER della base di dati relazionale.

Lo stesso edificio può subire più operazioni di rilievo, come si è dimostrato necessario anche a breve distanza di tempo dopo il terremoto di Marche/Umbria, 1997. La prima operazione di rilievo identifica anche tutte le informazioni “permanenti” dell’edificio; le successive aggiornano solo i danni, ed eventualmente l’uso, dell’edificio.

Una operazione di ristrutturazione invece va intesa nel senso di eliminare dal database degli edifici correnti il vecchio edificio e di sostituirlo con uno nuovo, avente la stessa chiave primaria. Il database degli edifici non più esistenti potrebbe essere conservato a parte, per documentazione storica.

E’ importante invece che tutte le operazioni di rilievo restino memorizzate nel database corrente, almeno fino al momento in cui l’edificio subisce l’operazione di riparazione/ristrutturazione.

La chiave primaria permanente per identificare l'edificio è costituita da: Istat Provincia, Istat Comune, Codice aggregato, Numero edificio,

La chiave primaria per identificare il rilievo è costituita dal Numero della Scheda, la chiave primaria dell'edificio oggetto del rilievo, il codice del rilevatore, la data del rilievo.

Le Tabelle 2.1. e 2.2 mostrano ad esempio la struttura delle Tabelle relazionali AGGREGATO STRUTTURALE e DANNO-PERICOLO, con i riferimenti ai campi delle schede S1, S2, S3, S4 e le Tabelle esterne che identificano i valori codificati.

In particolare si osservi come la tabella 2.2 è compatibile con la codifica del danno prevista nella scheda S2 ed S4, tramite record multipli per ogni livello o gruppi di livelli accorpati di danno e misura fuzzy dell'estensione.

Tabella 2.1 - Aggregato Strutturale

AGGREGATO STRUTTURALE		S1	S2	S3	S4	Note
c_prov	CHAR(3)	1	1	1	154	Tabella Istat collegabile
c_comune	CHAR(3)	26	3	3	157	Tabella Istat collegabile
c_aggregato	VARCHAR2(40)		34		160	Definito dal Coordinamento generale (COM, Comune, etc..)
Localita	VARCHAR2(5)				170	Tabella Istat collegabile
Foglio	VARCHAR2(2)		32		178	Definito dal Coordinamento generale (COM, Comune, etc..)
n_edifici	NUMBER(2,0)					E' il numero di edifici esistente nell'aggregato, non necessariamente coincidente col numero di edifici registrati
Sezione	VARCHAR2(5)		19		175	Riferimento catastale
foglio_c	VARCHAR2(3)		22		184	Riferimento catastale
mappale_c	VARCHAR2(3)		25		187	Riferimento catastale
Zona	CHAR(1)		40		-	Riferimento urbanistico
Morfologia	CHAR(1)				316	Tabella esterna : MORFOLOGIA
Piano	CHAR(1)		41		-	Riferimento urbanistico
Frazione	VARCHAR2(25)				51	Riferimento geografico
						<b>MORFOLOGIA</b> 1=cresta 2=pendio forte 3= pendio leggero 4=pianura

Tabella 2.2 - Danno e Pericolo

DANNO_PERICOLO		S1	S2	S3	S4	Note
c_prov	CHAR(3)	1	1	1	154	
c_comune	CHAR(3)	26	3	3	157	
c_aggregato	VARCHAR2(40)		34		160	
n_edificio	VARCHAR2(5)		38		165	
c_scheda	VARCHAR2(2)	51	6	6	142	
Data	NUMBER(2,0)	56	11		146	
Rilevatore	VARCHAR2(5)	62	17		140	
data_evento	NUMBER(2,0)		301			data del sisma
Struttura	VARCHAR2(					Tabella esterna STRUTTURA
Livello	VARCHAR2(5)					Tabella esterna LIVELLO DEL DANNO
dal_piano	NUMBER(2,0)					
al_piano	NUMBER(2,0)					
causa_danno			307			1(scheda S2) =A, B, C (scheda S4); 2( scheda S2)= D,E,F,G (scheda S4) Tabella esterna CAUSA DEL DANNO
estensione	FUZZYN					
provv_urg_eseguiti						tabella esterna
provv_urg_suggeriti						tabella esterna
<b>LIVELLO DEL DANNO</b>		<b>STRUTTURA</b>				<b>CAUSA DANNO</b>
DD= presenza danno	1=danno alle strutture verticali					A= generato da sisma recente
D0= nessun danno(=A in S2)	2=danno agli orizzontamenti					B= acuito da sisma recente
D1= leggero(=B in S2)	3=danno alle scale					C= da sismicità storica
D2= medio(=C in S2)	4=danno alle coperture					D= da degrado strutturale
D3= grave(=D in S2)	5=danno alle tamponature e tramezzi					E= da dissesti preesistenti del terreno o della fondazione
D2-D3= medio o grave	6=danno agli elementi strutturali					F= da altre cause identificate
D4= gravissimo(=E in S2)	7=distacco intonaci rivestimenti controsoffitti					G= non conosciuto
D5= totale(=F in S2)	8=caduta tegole, comignoli					A1=da crolli di altre costruzioni
D4-D5= gravissimo o totale	9=caduta cornicioni, parapetti					A2=da caduta di elementi di altre costruzioni
	10=caduta altri oggetti interni o esterni					
	11=danno alla rete idrica fognaria o termo-idraulica					
	12=danno impianti					

### 2.3.4 L'interfaccia VULNUS 2

Nella base di dati è già attiva l'interfaccia per l'acquisizione dei dati necessari per VULNUS e per la preparazione di files di input corrispondenti a specifici gruppi di edifici, prescelti con criteri molto generali. Selezioni più generali possono essere fatte tramite il linguaggio di interrogazione di Oracle. In Fig. 2.3 è mostrata la



finestra relativa ai dati generali degli edifici. In Fig. 2.4 la finestra relativa ai dati delle pareti e dei setti della pianta. In Figure 2.5 e 2.6 le finestre di visualizzazione dei dati di pareti e solai descritti nella base di dati e utilizzabili per la descrizione degli edifici.

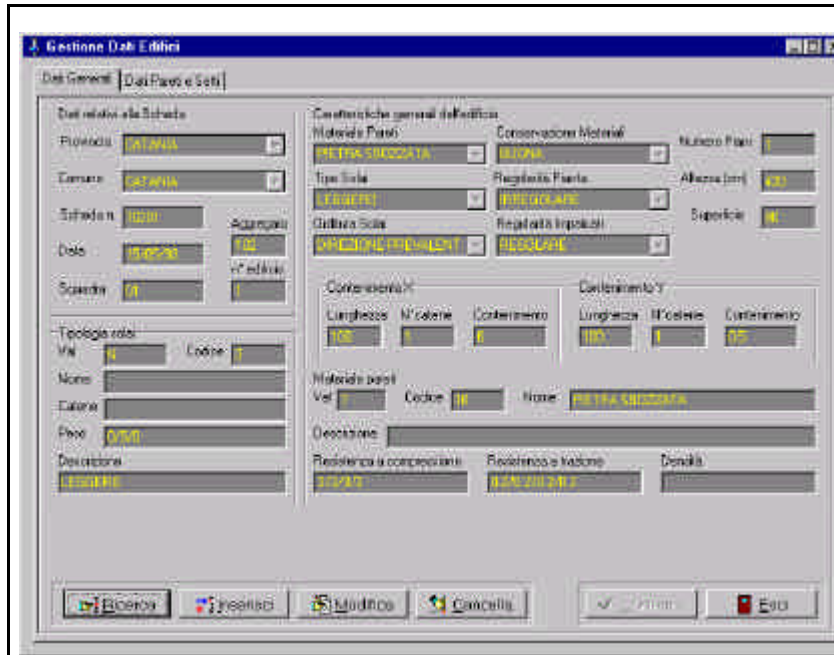


Fig. 2.3 – Finestra di ricerca, inserimento, modifica di edifici. Le caratteristiche di pareti e solai sono registrate nelle tabelle delle tipologie edilizie. Alcuni dei parametri sono misurati da *Fuzzy sets* (il peso dei solai) o *Fuzzy numbers* (resistenza a compressione e a trazione della muratura).

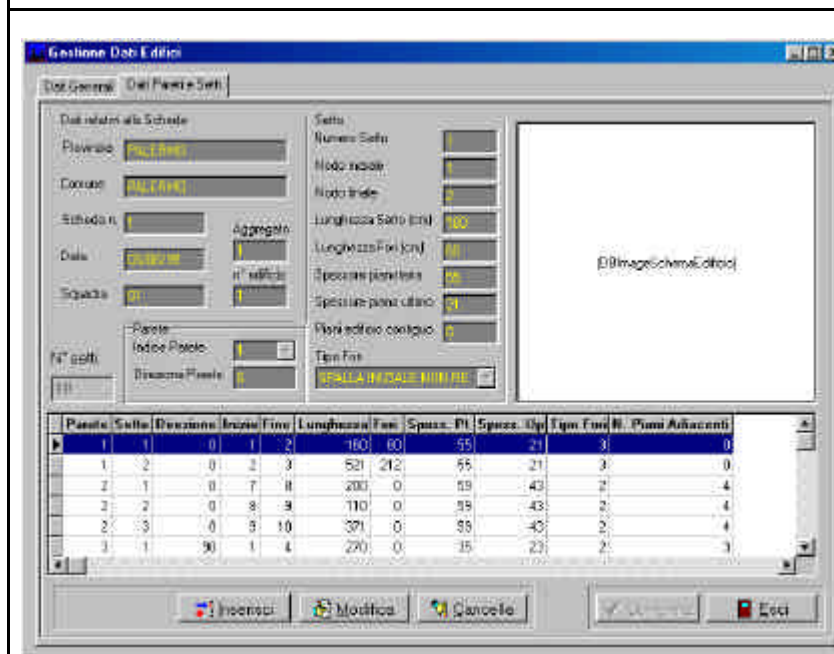


Fig. 2.4 - Finestre di lettura, inserimento e modifica delle informazioni relative ai setti e pareti dei singoli edifici. Il parametro N: PIANI ADIACENTI vale 0 per le pareti esterne di edifici isolati ed un valore negativo per i setti interni. Per i setti esterni adiacenti ad altri edifici il parametro corrisponde al numero di piani dell'edificio adiacente.

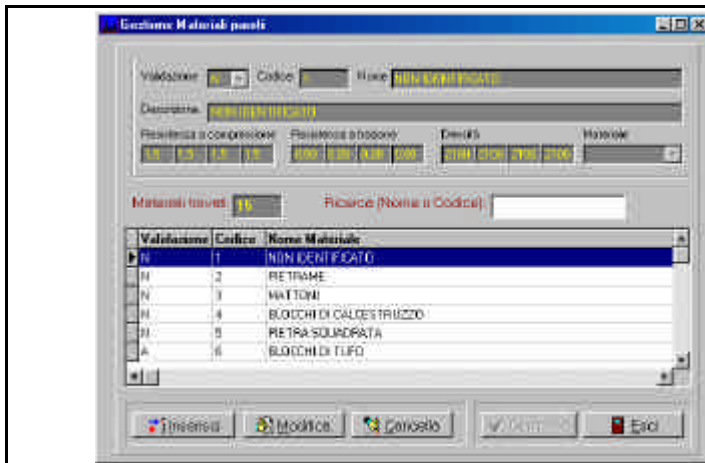


Fig. 2.5 – Finestra di visualizzazione delle tipologie di muratura. Si osservi la codifica come Fuzzy numbers della resistenza compressione, resistenza a trazione e densità della muratura (nel caso particolare il valore registrato è deterministico).

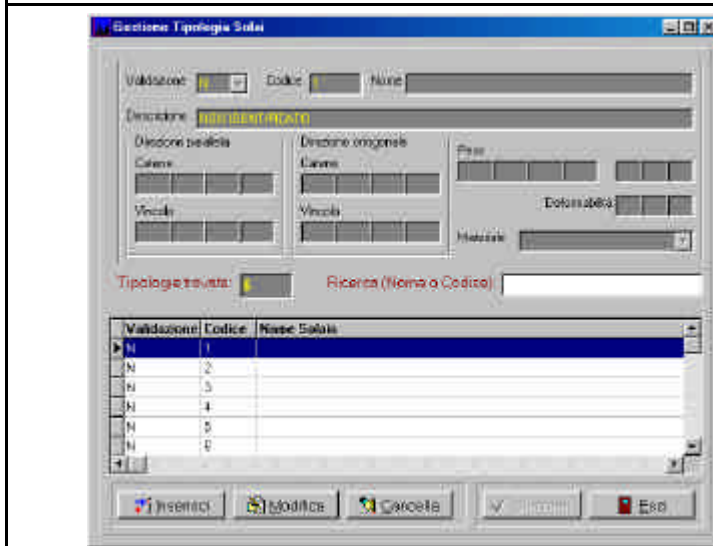


Fig. 2.6 - Finestra di visualizzazione delle tipologie di solai. Il parametro "Vincolo" misura, tramite fuzzy numbers, l'entità delle forze, in kN/m, che possono svilupparsi fra pareti e solai, rispettivamente in direzione parallela ed ortogonale all'orditura (ad esempio per effetto di attrito allo sfilamento delle travi). A queste vanno aggiunte le forze localizzate garantite dalla presenza di "Catene".

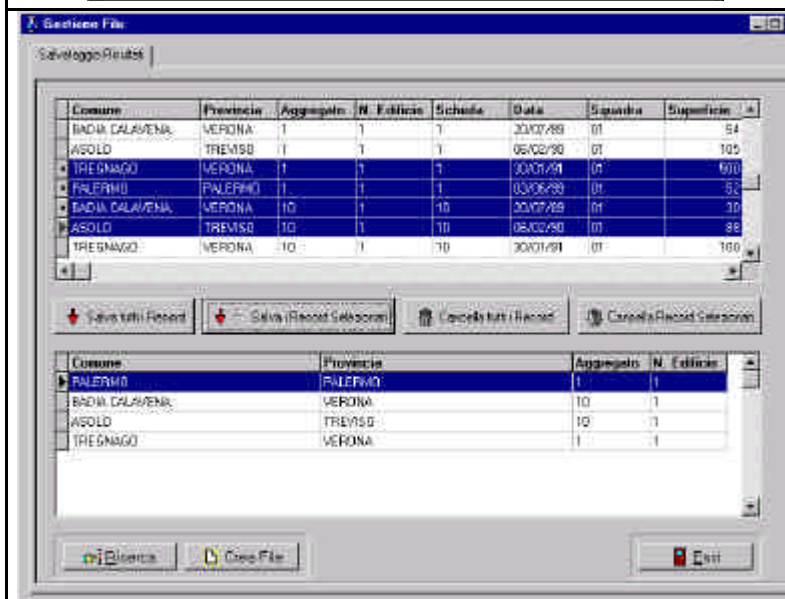
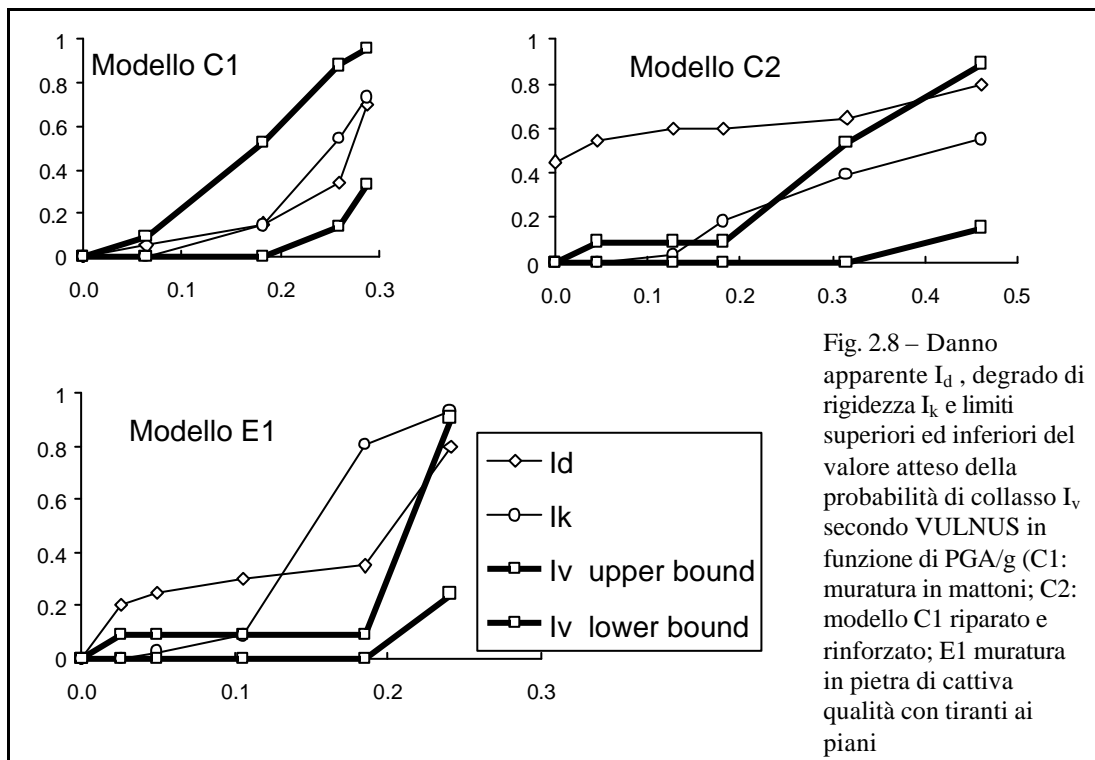


Fig. 2.7 - Finestra di selezione degli edifici da analizzare tramite Vulnus. Alla data attuale la base di dati contiene circa 350 edifici, in gran parte rilevati sulla montagna veneta ed in Sicilia (Palermo e Catania)

## 2.4 Confronti con sperimentazioni su tavola vibrante

Alcune correlazioni fra valori di vulnerabilità previsti da VULNUS sono state controllate tramite i risultati di una sperimentazione su tavola vibrante di modelli in scala 1:2 di edifici in muratura di mattoni o pietra e malta di bassa qualità. Nel programma sperimentale completo (Benedetti, Carydis & Pezzoli 1998) eseguito sulla tavola vibrante presso ISMES, Bergamo, 24 modelli sono stati sollecitati con eccitazioni tri-direzionali di intensità progressivamente crescente e contenuto in frequenza corrispondente alla registrazione di Calitri, 1980. Alcuni modelli sono stati ottenuti riparando e rinforzando alcuni modelli preventivamente testati in modo severo.

Le registrazioni relative a tre modelli sono stati particolarmente analizzati (Zanardo, 1998), valutando il rapporto fra i valori di picco della accelerazione media di risposta dell'edificio e della tavola vibrante (cfr. la conclusione richiamata nel § 2). Sono stati valutati inoltre due parametri di danno:  $I_d$  (Angeletti & altri, 1988) riassuntivo del danno apparente osservato al termine di ciascuna eccitazione, e  $I_k$  corrispondente al degrado della rigidezza di un sistema isteretico ad un grado di libertà equivalente alla risposta dinamica misurata al piano superiore (Zanardo 1999; Bernardini 1999). I risultati sono indicati in Fig. 2.8.

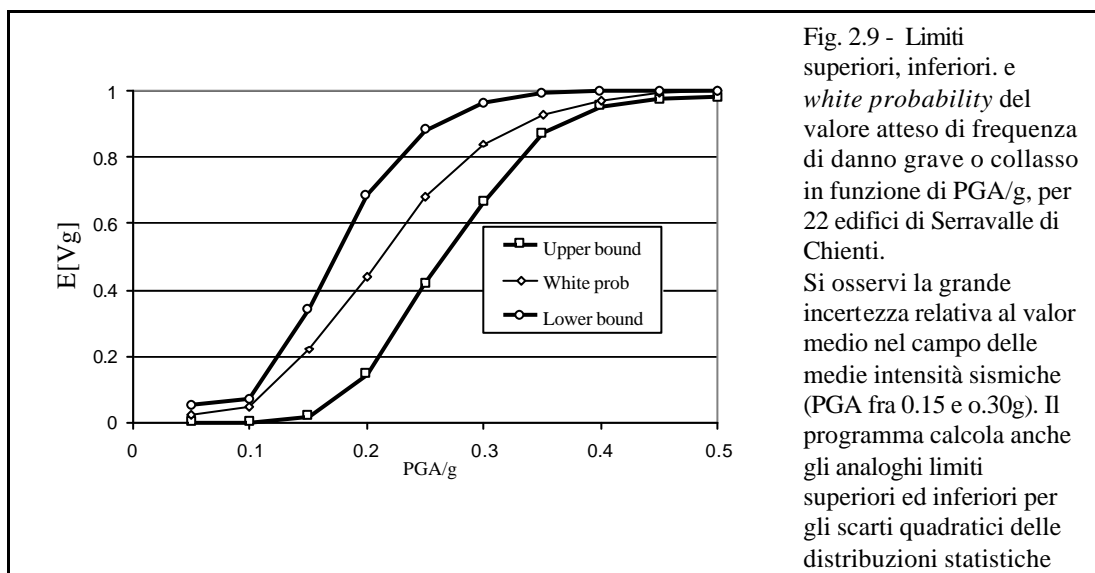


La correlazione fra parametri di danno e probabilità di collasso è positiva, come era ragionevole aspettarsi, ai valori critici di  $PGA$ ; ma è anche discreta, almeno

per il modello C1, per i livelli inferiori di eccitazione. Nel modello C2 resta ovviamente quasi invariato il danno apparente al termine del test su C1. Nel modello E1 la cattiva qualità della malta si riflette in un caduta di rigidità molto rapida già per livelli molto bassi dell'eccitazione.

## 2.5 Confronto con il campione di Serravalle del Chienti

Nel maggio 1999 un gruppo di 22 edifici in muratura nel Comune di Serravalle di Chienti, danneggiati dal sisma di Umbria-Marche (1997), dichiarati inagibili e non ancora riparati sono stati ispezionati, compilando tutte le 4 schede indicate nel § 2.3 (Scattolin 1999). E' stato possibile quindi valutare tramite VULNUS la vulnerabilità del gruppo  $V_g$  (Fig. 2.9) e, per ciascun edificio, il sottoinsieme sfuocato dell'intervallo  $[0, 1]$  della vulnerabilità  $V_u$  ed un valore centrale di corrispondente al valore *baricentrico* (media di  $V_u$  pesata tramite la funzione di appartenenza; in pratica il valore atteso  $E[V_u]$  di  $V_u$  sulla base della *White Probability*). In particolare sono stati considerati i valori corrispondenti ad accelerazioni medie di risposta pari a 0.16 e 0.28g, corrispondenti ai valori richiesti dal Regolamento Sismico vigente per la verifica allo stato limite ultimo di edifici in muratura di nuova costruzione, rispettivamente per zone di terza e seconda categoria (Serravalle di Chienti è classificato in seconda categoria). Si può stimare che questo intervallo includa (con probabile adiacenza all'estremo inferiore) i massimi valori di PGA della eccitazione principale del 26/9/97 con intensità MCS locale pari ad 7-8. Peraltro nella valutazione del danno osservato e misurato tramite l'indice di Angeletti Id definito nel § 2.4 si deve tener conto che la sequenza sismica ha compreso parecchie decine di eventi nei mesi successivi con intensità  $MCS \geq 6$ .



Sono state ricavate rispettivamente dalla scheda S2 ed S4 valori dell'indice  $I_d$ , nel seguito rispettivamente indicati come  $I_d(\text{GNDT})$  e  $I_d(\text{SSN})$ . Nel secondo caso, in mancanza di un preciso valore di estensione del danno più frequente e con una scala di misura del danno che accorpa D2 con D3 e D4 con D5, si sono assunte ragionevoli ipotesi per il calcolo dell'indice. La Fig. 2.10 indica peraltro una sistematica differenza fra le due scale, probabilmente giustificata dal fatto che la scheda S4 richiede al rilevatore una stima esplicita dell'intera distribuzione del danno e della sua estensione, mentre la scheda S2 concentra l'osservazione particolarmente sul danno più esteso (in questo caso generalmente inferiore a 0.2). La correlazione fra le due misure risulta comunque discreta ( $R^2 = 0.42$ ).

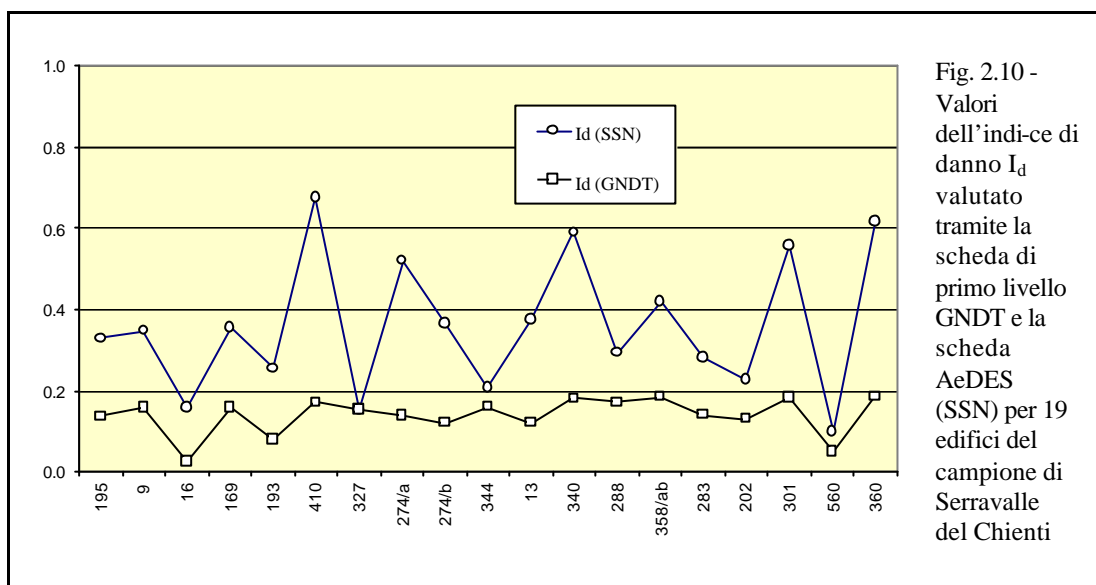
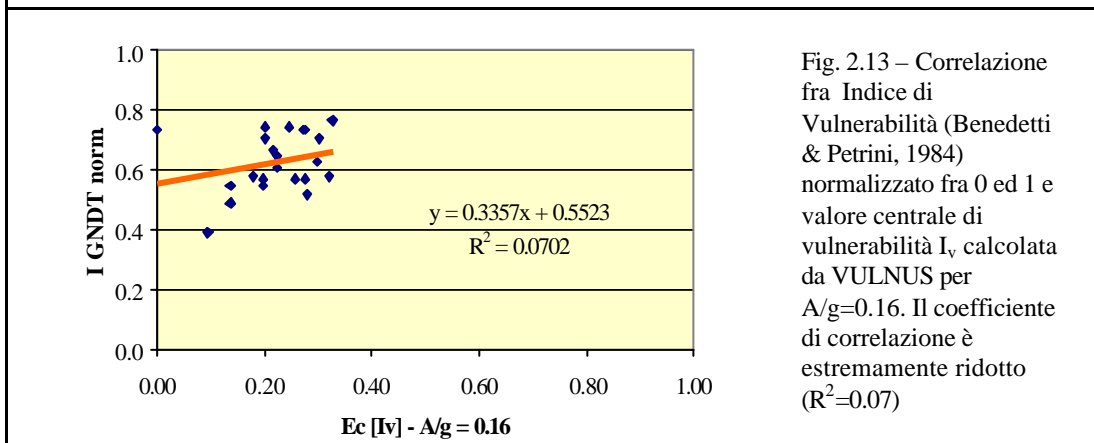
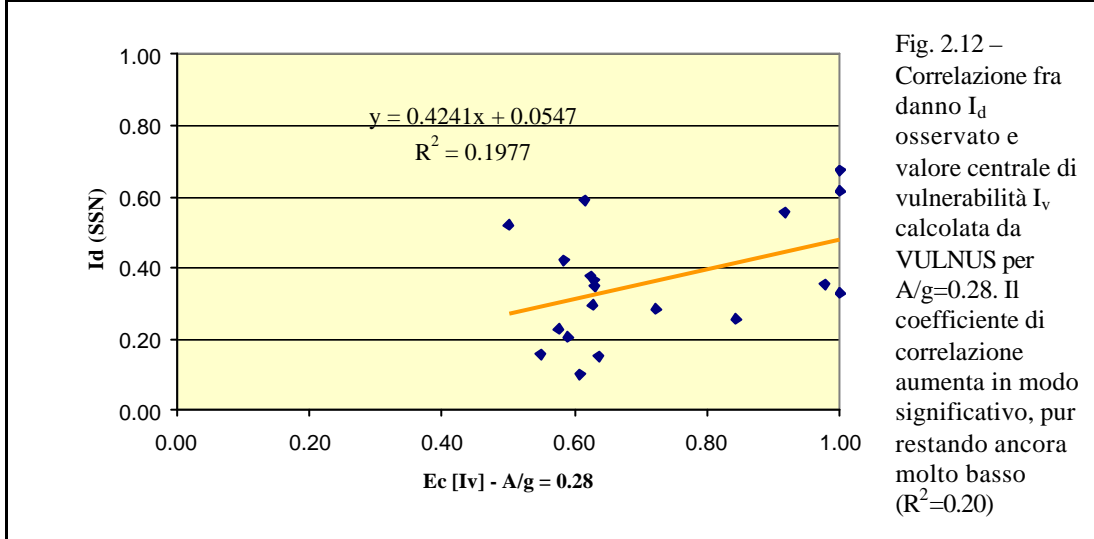
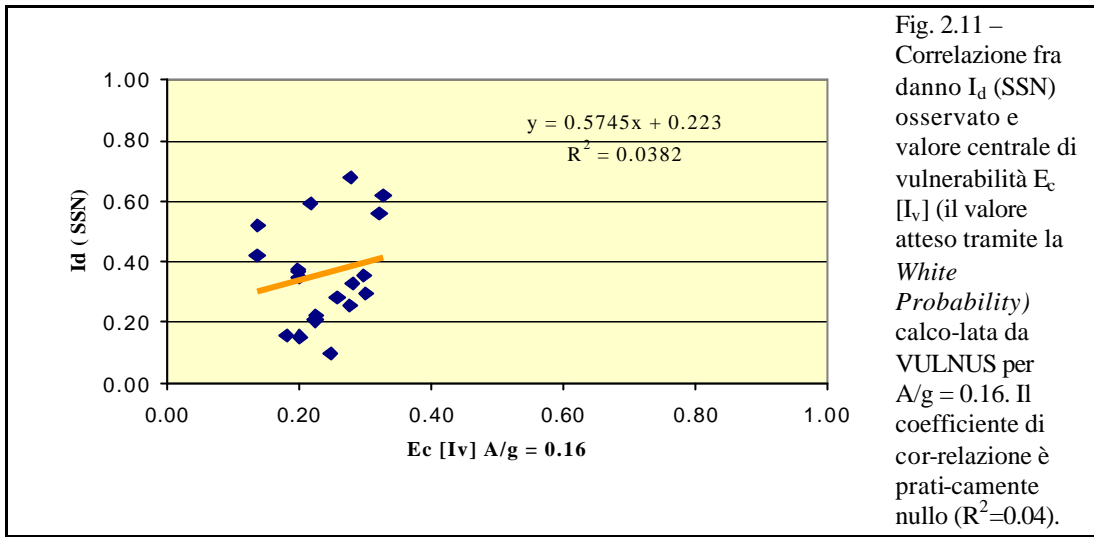
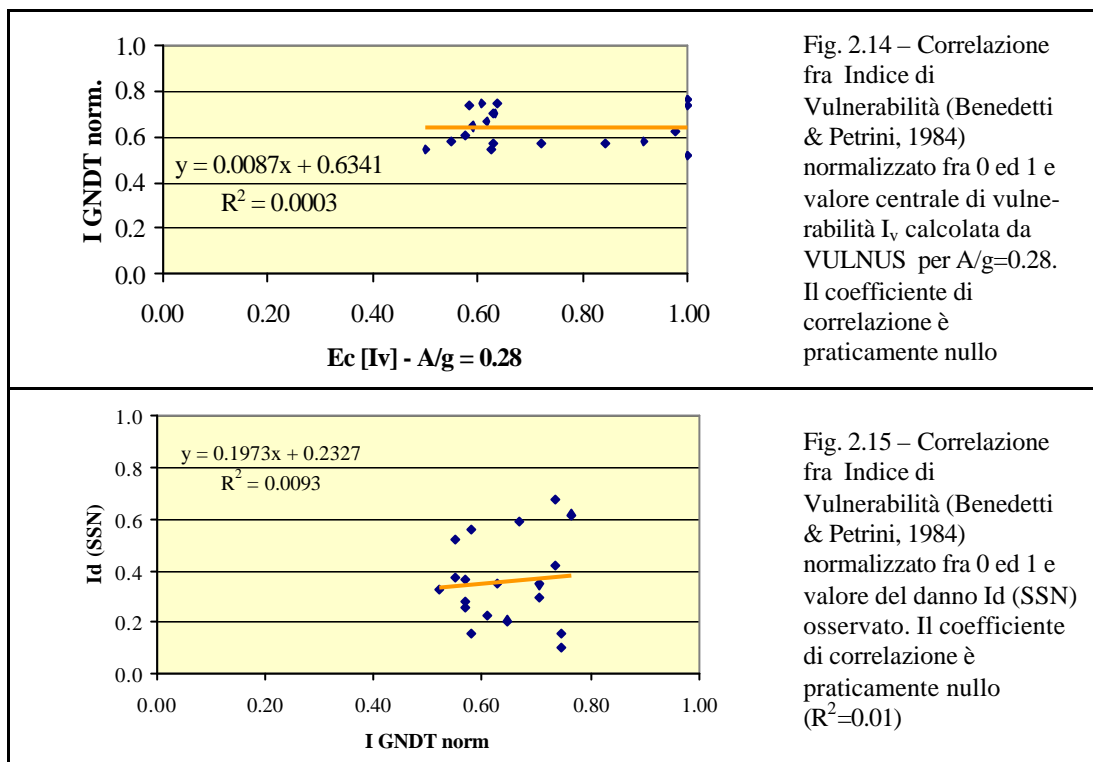


Fig. 2.10 - Valori dell'indice di danno  $I_d$  valutato tramite la scheda di primo livello GNDT e la scheda AeDES (SSN) per 19 edifici del campione di Serravalle del Chienti

La correlazione fra danno  $I_d(\text{SSN})$  e vulnerabilità prevista da VULNUS (intesa come probabilità di collasso o danno grave  $\geq D4$ ) è, come prevedibile, praticamente inesistente per  $A/g = 0.16$  (Fig. 2.11), più consistente per  $A/g = 0.28$  (Fig. 2.12), con un livello di danneggiamento degli edifici molto variabile e compreso fra D1 e D4.

Le Figure 2.13 e 2.14 mostrano la correlazione, piuttosto bassa, fra l'Indice di vulnerabilità di Benedetti-Petrini  $I_{\text{GNDT norm}}$  e  $I_v$  rispettivamente per  $A/g = 0.16$  e  $A/g = 0.28$ ; la Fig. 2.15 la correlazione pressochè inesistente fra  $I_d(\text{SSN})$  osservato e  $I_{\text{GNDT norm}}$  (che è indipendente dall'intensità sismica).





## 2.6 Conclusioni

La procedura VULNUS costituisce uno strumento molto potente per l'analisi della vulnerabilità sismica al collasso di edifici in muratura, basata su un rilievo di dati non più oneroso di quello richiesto per la scheda GNDT di secondo livello.

I confronti eseguiti con test sperimentali con tavola vibrante su modelli di edifici hanno permesso di correlare i risultati del modello alla PGA locale, al degrado di rigidità e al danno apparente.

Le applicazioni ed i confronti eseguiti sul campione di Serravalle di Chienti non consentono ancora di eseguire una convincente calibrazione di VULNUS, soprattutto tenendo conto che gli edifici hanno subito livelli di danno medio o leggero. La correlazione fra danno osservato e probabilità di collasso prevista da VULNUS è praticamente nulla per bassi valori dell'eccitazione ( $PGA = 0.16g$ ); tuttavia si osserva un significativo incremento della correlazione già a partire da valori di  $PGA$  prossimi a  $0.28g$ . Invece rimane sostanzialmente nulla per ogni valore dell'eccitazione la correlazione fra danno osservato ed Indice di vulnerabilità calcolato a partire dalle schede di secondo livello del GNDT secondo la metodologia di Benedetti & Petrini, 1984.

L'utilizzo della scheda di agibilità nella misura del danno globale secondo la formulazione di Angeletti & altri, 1988 tende a fornire valori numerici sistematicamente superiori a quelli derivati dalla registrazione analitica del danno ai

diversi piani tramite la scheda di primo livello del GNDT; la correlazione fra le due misure di danno risulta peraltro discreta.

La creazione e lo sviluppo della nuova base di dati descritta in questa relazione sarà in futuro uno strumento molto potente per una sistematica registrazione delle tipologie e del loro danneggiamento sismico, da cui ci si può attendere una effettiva calibrazione della procedura.

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano Giovanna Zanardo e Marco Scattolin per i contributi alla ricerca ottenuti nell'elaborazione della loro tesi di laurea in Ingegneria Civile. Si ringrazia inoltre il gruppo di ricerca coordinato dal Prof. E. Segato presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale dell'università di Padova per il supporto dato allo sviluppo in ambiente Oracle della base di dati: in particolare gli Ingegneri Bandiera e Gianni Strazzer, nonché Stefano Gallina, che ha svolto sull'argomento la sua tesi di diploma in Ingegneria Informatica.



## Bibliografia

- Angeletti, P., Bellina, A., Guagenti, E., Moretti, A. & Petrini, V. (1988): Comparison between Vulnerability Assessment and Damage Index, Some Results. In *Proc. 9th World Conf. on Earthquake Engng., Tokyo-Kyoto, 1988*: **7**, 181-186
- Benedetti, D., Carydis, P.G. & Pezzoli, P. (1998): Shaking table tests on 24 simple masonry buildings. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* **27**: 67-90
- Benedetti, D. & Petrini, V. (1984): Sulla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura: un metodo di valutazione. *L'Industria delle Costruzioni*, **149**: 66-74
- Bernardini, A. (1995): Valutazioni di frequenze attese di eventi da misure sfuocate di vulnerabilità sismica. In A. Borri & F. Braga (eds), *Atti del 7° Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia, Siena , 25-28 September 1995*: vol. **1**, 53-62. Siena: Collegio degli Ingegneri della Toscana
- Bernardini, A. (1997): Coerenza fra osservazioni e previsioni di vulnerabilità sismica di tipologie murarie. In G. Zingone (ed), *Atti del 8° Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Taormina , 21-24 Settembre 1997: vol. **1**, 177-183, vol. **2**, 1373. Palermo: Priulla.
- Bernardini, A. (1999): Qualitative and quantitative measures in seismic damage assessment and forecasting of masonry buildings. In A. Bernardini (ed), *Seismic Damage to Masonry Buildings. Proceedings of the International Workshop on Seismic Damage to Masonry Buildings*, 169-178, Monselice, Giugno 1998, Rotterdam: Balkema
- Bernardini, A., Gori, R. & Modena, C. (1990): An application of coupled analytical models and experiential knowledge for seismic vulnerability analyses of masonry buildings. In A. Koridze (ed) *Engineering aspects of earthquake phenomena*, vol. **3**: 161-180. Oxon: Omega Scientific
- Gallina, S. (1999): Rielaborazione delle procedure di calcolo e gestione dei dati del progetto VULNUS. *Università di Padova. Dipartimento di Elettronica ed Informatica*, AA.1998-99
- Grunthal, G. (1998): European Macroseismic Scale 1998 , *Cahiers du Centre Europ. de Géodyn. et de Séismologie* vol **15**: 1-99
- Scattolin, M. (1999): Vulnerabilità calcolata e danno osservato su edifici in muratura nel Comune di Serravalle di Chienti. *Università di Padova, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Tesi di Laurea* , AA 1998-99
- Zanardo, G. (1998): Modelli sperimentali e numerici di comportamento sismico di edifici in muratura. *Università di Padova, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Tesi di Laurea*, AA 1997-98