

Stima speditiva degli scenari di danno sismico atteso per edifici in muratura mediante l'utilizzo di curve di Probit

Fausto Barazza, Stefano Grimaz, Petra Malisan, Enrico Del Pin

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università degli Studi di Udine. Via Cotonificio 114, Udine.

Fabrizio Meroni

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia- Sezione di Milano via Bassini 15 - Milano

Keywords: Probit, danno sismico, previsione, scenari di danno

ABSTRACT

Nel presente lavoro si presentano le curve di vulnerabilità degli edifici in muratura ricavate dall'analisi dei dati del terremoto del Friuli del 1976. In particolare le curve sono ricavate tramite l'analisi di Probit, una tecnica statistica largamente in uso nel campo delle analisi di rischio industriale e più in generale nei settori in cui si studiano fenomeni governati da una legge dose-effetto di tipo sigmoidale. Nell'articolo si mostra come tali curve possono essere direttamente impiegate per valutazioni previsionali di danno atteso su scala territoriale in quanto consentono di ricavare in modo relativamente semplice e rapido la percentuale di edifici che, sottoposti ad una determinata azione sismica, subiscono un determinato livello di danno strutturale espresso nella scala EMS-98. Nel lavoro si propone inoltre una metodologia di stima più ampia dello "scenario di danno", basata sull'uso di una matrice di correlazione che lega l'indice di danno EMS-98 agli effetti indiretti in termini di giudizio di agibilità, riparabilità e probabilità di vittime associate. Tale matrice, anch'essa messa a punto sulla base dei dati del terremoto del Friuli, è stata validata e calibrata sui dati dalle schede AeDES compilate in occasione del terremoto Umbria-Marche.

1 INTRODUZIONE

Il problema di relazionare la severità di un'azione agli effetti prodotti in termini di danno, è presente in molti campi dell'analisi del rischio. Spesso, come avviene nel settore della sicurezza industriale e nella tossicologia, queste relazioni sono derivate da un'analisi di tipo statistico sulle osservazioni degli effetti a posteriori. Un valido strumento per un tale tipo di analisi è il Probit. Si tratta di una tecnica che permette di ricavare delle relazioni di tipo statistico che consentono di associare ad una dose la percentuale della popolazione che subisce un determinato effetto.

Anche nell'ingegneria sismica c'è la necessità di disporre di modelli che consentano di stimare la distribuzione di probabilità del danno atteso nota l'entità dell'azione sismica. L'impiego di tali modelli, unito alla geo-referenziazione delle tipologie edilizie, dà utili informazioni sullo scenario di danno atteso, e quindi permettere la stima non solo dei danni diretti, ma anche dei

possibili senz'altro e delle vittime potenziali. In questo articolo, in particolare, si presentano le curve di vulnerabilità derivate con la tecnica del Probit a partire dai dati del terremoto del 1976 in Friuli e una loro applicazione per la stima degli scenari di danno atteso.

2 LO STRUMENTO DI ANALISI: IL PROBIT

L'analisi Probit (Finney, 1971; Aldrich e Nelson, 1984) è una tecnica statistica di regressione non lineare utilizzata per modellare la relazione esistente tra uno stimolo (chiamato "dose" o "azione") ed il manifestarsi o meno di un determinato effetto espresso in termini dicotomici (si/no, 0/1, oppure vero/falso). Ampliamente utilizzata nel campo del rischio industriale e nella biologia, nasce di fatto nel campo della tossicologia. L'analisi Probit assume un legame azione-effetto non lineare ed in particolare ipotizza che per azioni deboli si abbia una risposta pressoché nulla, mentre

all'aumentare dell'azione ci sia un incremento proporzionale dell'effetto, ma solo fino al raggiungimento di una determinata soglia, detta di saturazione. In sostanza la curva dose-effetto assume la forma di una sigmoide, curva che nell'analisi Probit si assume essere la curva di probabilità cumulata normale. Mediante l'introduzione di una trasformazione di scala attraverso una opportuna variabile è possibile ricondurre il problema da non lineare a lineare. Tale variabile è detta per l'appunto variabile di Probit ed indicata nel seguito come Y_{Pr} . In pratica, si può dire che la variabile di Probit Y_{Pr} è una misura della percentuale $P_{\%}$ della popolazione bersaglio che subirà un determinato effetto, una volta che questa sia esposta ad una azione (o dose) V . Y_{Pr} è definita in modo tale da soddisfare le relazioni che seguono:

$$P_{\%} = 100 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y_{Pr}-5} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du \quad (1)$$

e in modo equivalente

$$P_{\%} = 100 \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \frac{Y_{Pr}-5}{|Y_{Pr}-5|} \operatorname{erf}\left(\frac{|Y_{Pr}-5|}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2)$$

dove $P_{\%}$ indica la percentuale espressa nell'intervallo $[0,100]$ e u è sostanzialmente la deviazione equivalente normalizzata alla varianza (indicata anche con N.E.D.: Normal Equivalent Deviate). Teoricamente la variabile di Probit Y_{Pr} assume valori su tutto l'asse reale, ma in pratica i valori utilizzati sono compresi tra 2 e 8. Le relazioni (1) e (2) sono costruite in modo tale che un valore $Y_{Pr} = 5$ indichi che il 50% della popolazione investita dall'azione (o sottoposta alla dose) ha subito l'effetto.

In problemi dose-effetto, per calcolare la variabile di Probit (Y_{Pr}), Finney (1971) propone di utilizzare il logaritmo della dose, per cui generalmente si assume la seguente relazione tra variabile di Probit e dose:

$$Y_{Pr} = a + b \log_{10} V \quad (3)$$

dove a e b sono costanti da determinarsi sperimentalmente dalle informazioni sugli effetti osservati. Poiché l'Eq. (3) è lineare nel logaritmo della dose, il passaggio dalla percentuale della popolazione che ha subito l'effetto ($P_{\%}$) al

corrispondente valore Probit (Y_{Pr}) consente di ricondurre il problema della regressione non lineare ad una lineare e pertanto di determinare le costanti a e b del modello Probit mediante regressione lineare.

Si osservi che nel caso in cui la curva di probabilità cumulata sia proprio la normale, allora il coefficiente di correlazione R^2 associato alla retta di regressione (3) è pari a uno. Quindi, con questa tecnica il coefficiente di correlazione è anche indice di quanto il campione effettivamente soddisfatti l'ipotesi di distribuzione normale.

Come si vedrà nel paragrafo 4, l'analisi Probit può essere applicata anche al campo sismico. In questo caso la dose, o azione, può essere rappresentata da uno dei parametri *ground-motion* (quali PGA, PGV, AI, intensità di Housner ecc.) mentre l'effetto può essere espresso in termini di percentuale di edifici che subiscono un danno superiore ad una soglia prefissata. Ovviamente affinché i parametri del modello Probit si possano ritenere statisticamente significativi, devono essere stimati su un numero sufficientemente elevato di dati.

3 I DATI: IL DATABASE FR.E.D.

Dopo il terremoto del Friuli del 6 maggio 1976, come richiesto dalla LR. 17/76, sono stati ispezionati circa 85.000 edifici e un pari numero di verbali di accertamento danni sono stati compilati e raccolti. L'obiettivo di tale censimento era quello di definire il numero di edifici non più abitabili dopo il terremoto e valutare i costi di riparazione. L'insieme dei dati raccolti tramite le schede consentono di avere informazioni sia sul livello dei danni che sulle caratteristiche della costruzione.

Studi effettuati immediatamente dopo il terremoto (Giorgetti, 1976) hanno portato alla definizione dei livelli di intensità macrosismica (MSK) risentita nell'area colpita dal terremoto.

All'inizio del 1990, un gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Udine ha acquisito tutte le schede raccolte nel 1976 e le ha organizzate in una banca di dati denominata Fr.E.D. (Friuli Earthquake Damage; Di Cecca e Grimaz, 2008). Sulla base di questi dati, sono stati effettuati degli studi sulla vulnerabilità sismica (Grimaz, 1993; Grimaz et al., 1997) ed in particolare Riuscetti et al. (1997) e Carniel et al. (2001) hanno analizzato le informazioni contenute nel database Fr.E.D. e hanno definito

Tabella 1. Tipologie di Vulnerabilità derivate dal database Fr.E.D..

Caratteristiche				Vulnerabilità				
Materiale	Data di costruz.	Contesto strutturale	piani	Tipologia				
muratura pietra	< 1920	Edifici isolati o edifici in aggregato	< 5	T1				
				1920-1950	Edifici isolati o edifici in aggregato	3-5 <5	T2	
							1920-1950	Edifici isolati
	pietra a/matton	>1950	Edifici isolati o edifici in aggregato	3-5	T4			
					>1950	edifici in aggregato	1-2	T5
								> 1950

sei classi di vulnerabilità significativamente diverse, corrispondenti alle sei diverse tipologie di edifici in muratura riportate in Tabella 1.

Visto il carattere di emergenza dell'operazione di compilazione e raccolta delle schede post-terremoto, il database Fr.E.D. non contiene i dati di tutti gli edifici ed in particolare di quelli che hanno subito danni molto lievi o nulli, oppure in qualche caso di quelli completamente distrutti. Questo fatto incide sulla distribuzione delle frequenze dei gradi di danno, soprattutto nei centri urbani con intensità inferiore a VII, e quindi con un maggior numero di edifici non censiti. Ciò rende difficile un'analisi statistica su ogni livello di danno, e quindi l'applicazione di metodi come quello delle Matrici di Probabilità di Danno (Damage Matrix Probability DPM). Tale incompletezza, viceversa, non inficia la possibilità di utilizzo dell'analisi Probit.

La numerosità, la qualità e la tipologia dei dati contenuti nel database Fr.E.D. si prestano quindi ad essere analizzate con la tecnica del Probit al fine di estrapolare le curve di risposta sismica per le diverse tipologie di edifici.

I livelli di danno previsti nei verbali di accertamento danni possono essere direttamente correlati con i gradi della scala EMS98 (tabella 2). Nella corrispondenza mostrata in tabella 2 è stato introdotto un grado di danno (G5+) con lo

scopo di distinguere la parte superiore del grado G5 della scala EMS-98, corrispondente agli edifici completamente distrutti. In tal modo si riesce a stabilire, per i livelli di danno superiori al G3 della scala EMS-98, una corrispondenza praticamente biunivoca tra le due scale.

Ai fini dell'analisi Probit e del loro impegno previsionale, possono essere definite due soglie di danno: danni di livello $\geq G3$, edifici danneggiati dal sisma e che quindi sono stati giudicati inagibili, e danni di livello $\geq G5$, edifici che hanno subito dei danni gravi e pertanto sono stati giudicati non ripristinabili (NR) o, nella peggiore delle ipotesi, distrutti (D).

Tabella 2. Corrispondenza tra il grado di danno Fr.E.D. ed il grado di danno EMS-98.

Danno Fr.E.D.	RN		TR	PR	NR	D
Danno EMS-98	G1	G2	G3	G4	G5	G5+
RN Ripristinabilità non necessaria						
TR Totalmente Ripristinabile						
PR Parzialmente Ripristinabile						
NR Non Ripristinabile						
D Distrutto						

4 APPLICAZIONE DELL'ANALISI PROBIT

Come accennato in precedenza, l'analisi Probit assume che se la dose è espressa in una determinata scala (detta Metametric Scale of Dose o MSD) la probabilità di raggiungimento di un certo livello di danno per una determinata tipologia edilizia, sia normalmente distribuita.

Si pone quindi il problema di individuare quale parametro possa essere assunto come dose.

Tenendo conto delle osservazioni formulate da Spence et al. (1991) sulla distribuzione dei danni sismici si ha che una corretta scelta della MSD è:

$$MSD = \log_{10} V_{g.m.} \quad (3)$$

dove $V_{g.m.}$ è un parametro "dose" di *ground-motion*.

D'altra parte si osserva che l'intensità macrosismica I è tipicamente correlata linearmente al logaritmo di un parametro di *ground-motion* $V_{g.m.}$, cioè una relazione del tipo

$$I = a + b \log_{10} V_{g.m.} \quad (4)$$

Confrontando la (3) e la (4) è pertanto ragionevole considerare come MSD un indice

continuo direttamente derivante dal grado di intensità macrosismica (che invece è un parametro discreto), e quindi porre

$$I = a + b \log_{10} V_{g.m.} = a + b \cdot MSD \quad (5)$$

In questo modo ad una intensità macrosismica del VII grado è associato un valore MSD=7, ad una del VIII è associata un valore MSD=8 e così via.

In particolare nell'analisi Probit la MSD è stata considerata come variabile indipendente, ed è stata collegata direttamente al grado di intensità macrosismica secondo la scala MSK. Infatti, anche se la conversione diretta tra le scale di intensità non dovrebbe mai essere fatta, il rapporto tra le principali scale (come MSK, MMI e MCS) e EMS-98 si può ritenere circa 1:1 (Musson et al. 2006). La Tabella 3 mostra la corrispondenza tra la MSD e l'intensità MSK. Si noti che spesso il campo di applicazione di tali formule è limitato a ben definiti intervalli di MSD.

Tabella 3. Corrispondenza tra Metametric Seismic Dose (MSD), grado di intensità macrosismica I_{MSK} , grado di intensità macrosismica EMS-98.

MSD	6.5	7	7.5	8	8.5	9	10
I_{MSK}	VI-VII	VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX	IX	X
EMS-98	6-7	7	7-8	8	8-9	9	10

Anziché esprimere le relazioni di Probit in termini di dose (e quindi di parametri *ground-motion*) è possibile esprimerle direttamente in termini di MSD, per poi eventualmente utilizzare altre relazioni che esprimano la MSD in termini del parametro *ground-motion* di interesse (Tabella 4).

È utile però fare qualche considerazione sul parametro *ground-motion* che è più opportuno utilizzare. Ad esempio la maggior parte degli edifici compresi nel database Fr.E.D. sono rappresentati da edifici in muratura. Il comportamento isteretico di questo tipo di edificio suggerisce di porre in relazione il danno principalmente con l'energia messa in gioco dal sisma, e quindi con un parametro che sia legato alla velocità. Questo fatto suggerirebbe di utilizzare ad esempio la PGV piuttosto che la PGA. Tuttavia, in questo lavoro anche PGA è stata considerata. Il motivo è da attribuire al fatto

che le mappe della pericolosità forniscono valori di PGA, e non di PGV. Ad ogni modo, note le correlazioni, le equazioni derivanti dall'analisi Probit possono essere utilizzate per la valutazione predittiva utilizzando valori MSD derivanti sia dalla PGA (riportati nella mappa di pericolosità) che dalla PGV come pure di qualsiasi altro parametro *ground-motion*, qualora noto.

Tabella 4. Principali correlazioni tra MSD e parametri *ground-motion*.

Slejko et al., (2008): validità: 2.5 = MSD = 8.5	$MSD = 2.1 + 4.35 \log_{10} a_{max}$	$R^2 = 0.74$	$a_{max} (cm/s^2)$
Faccioli e Cauzzi (2006): validità: 4.5 = MSD = 9	$\log_{10} v_{max} = -3.53 + 0.35MSD$	$R^2 = 0.61$	$v_{max} (m/s)$
	$\log_{10} a_{max} = -1.33 + 0.2MSD$	$R^2 = 0.38$	$a_{max} (m/s^2)$
Cabanias et. al. (1997)	$\ln AI = -6.42 + 1.5MSD$	$R^2 = 0.92$	$AI (cm/s)$
	$\ln CAV = -3.54 + 1.24MSD$	$R^2 = 0.91$	$CAV (cm/s)$
Decanini et. al. (2002)	$\log_{10} PGA = 0.594 + 0.197MSD$		$PGA (cm/s^2)$
	$\log_{10} PGV = -0.641 + 0.225MSD$		$PGV (cm/s)$
	$\log_{10} I_H = -0.64 + 0.29MSD$		$I_H (cm)$

È anche utile osservare che nell'utilizzare le correlazioni tra parametri *ground-motion* e MSD si introduce un'ulteriore grado di incertezza, che è inversamente proporzionale al coefficiente di correlazione riportato nella Tabella 4. Conviene quindi utilizzare non solo la relazione che ha un maggiore grado di correlazione, ma anche quella che si ritiene riferita al parametro *ground-motion* maggiormente correlato al danno.

5 EQUAZIONI DI PROBIT DAI DATI FR.E.D.

L'analisi Probit è stata applicata sull'intero set dei dati presenti nella banca dati Fr.E.D. dai quali però sono stati esclusi quelli relativi a 2 comuni, utilizzati poi come siti-test nell'impiego delle curve di Probit come strumenti previsionali.

La Tabella 5 mostra i risultati delle analisi Probit per le sei classi tipologiche di vulnerabilità individuate in Tabella 1, relative a diverse soglie di danno, mentre la Figura 1 riassume

graficamente i risultati per un indice di danno $\geq G3$ (Grimaz, 2009).

In particolare, la Tabella 5 fornisce per ogni caso esaminato i coefficienti delle curve Probit riferiti ad una determinata soglia di danno e, anche se i risultati nascondono l'incertezza dovuta ad eventuali effetti di sito, i coefficienti di correlazione ottenuti indicano che l'ipotesi sulla distribuzione normale cumulativa è generalmente soddisfatta. Fanno eccezione i casi evidenziati con sfondo grigio, per i quali si ottiene un coefficiente di correlazione inferiore ad una determinata soglia, fissata ad un valore di 0.7.

Tabella 5 Coefficienti delle equazioni Probit derivate per ogni tipologia e per ogni livello di soglia di danno (in grigio le curve con correlazione R^2) da Grimaz, 2009

$Y_{Pr} = a + b \log_{10}(V) = a + b \cdot MSD$ for 6.5 = MSD=10 (6)								
Soglia di Danno	Probit	Coeff.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Fr.ED: TR-D EMS-98: $\geq G3$	$Y_{Pr \geq G3}$	a	2.82	3.09	3.48	2.45	2.83	4.14
		b	0.40	0.33	0.26	0.33	0.25	0.06
		R^2	0.90	0.90	0.87	0.74	0.70	0.28
Fr.ED: PR-D EMS-98: $\geq G4$	$Y_{Pr \geq G4}$	a	-1.68	-2.28	-1.79	-2.57	-0.97	-0.45
		b	0.71	0.73	0.66	0.70	0.47	0.40
		R^2	0.89	0.90	0.90	0.86	0.73	0.87
Fr.ED: NR-D EMS-98: $\geq G5$	$Y_{Pr \geq G5}$	a	-1.73	-2.35	-1.20	-2.02	-0.58	-0.11
		b	0.67	0.69	0.54	0.60	0.39	0.34
		R^2	0.88	0.91	0.86	0.84	0.69	0.83
Fr.ED: D EMS-98: $G5^+$	$Y_{Pr \geq G5^+}$	a	-0.65	-1.06	-0.24	-0.01	0.58	1.17
		b	0.42	0.44	0.34	0.30	0.20	0.12
		R^2	0.96	0.92	0.62	0.86	0.71	0.60

In grigio le equazioni con $R^2 < 0.7$

L'applicazione di un test-t di Student con intervallo di fiducia del 95% ha confermato che le relazioni ottenute sono significativamente diverse per le 6 tipologie.

Le serie di dati sono state analizzate anche separatamente per diverse zone omogenee (zona montana, zona pedemontana-collinare e zona di pianura), ma in seguito alle verifiche si è osservato che i risultati ottenuti non presentano differenze statisticamente significative rispetto alle equazioni Probit calcolate per l'intera

regione. La Figura 2 mostra ad esempio, per la tipologia edilizia T1 e per un livello di danno $\geq G3$, il confronto tra le rette di regressione ottenute per tutta la regione (in arancione) e per la sub regione pedemontana-collinare e montana rispettivamente (in rosso).

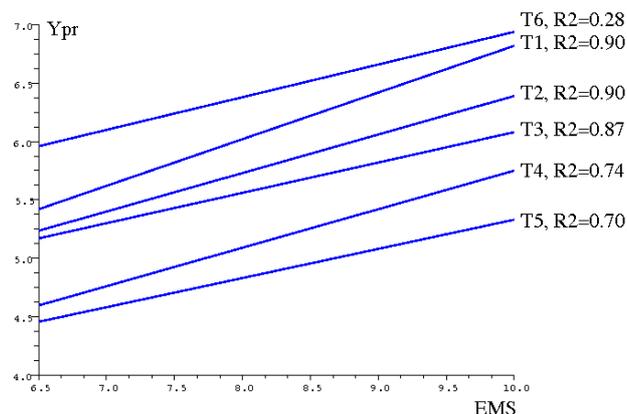
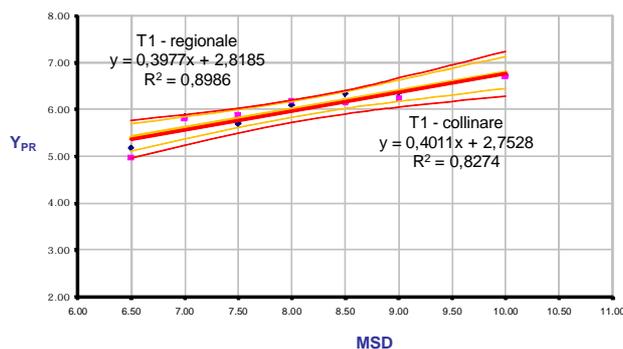


Figura 1. Rette di regressione Probit per le diverse classi di vulnerabilità tipologica per un livello di danno $\geq G3$.

T1. Confronto regionale - pedemontana/collinare Danno = G3



T1. Confronto regionale - montano Danno = G3

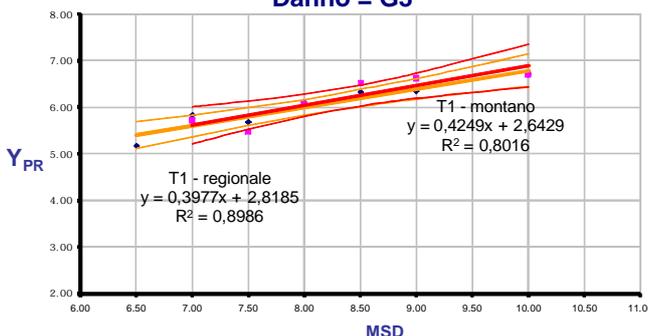


Figura 2. Confronto tra le rette di regressione ottenute per tutta la regione, e per la sola zona montana.

6 PREVISIONE DI SCENARI POST-TERREMOTO ATTRAVERSO LE EQUAZIONI DI PROBIT

Le equazioni di Probit derivate dai dati di Fr.E.D. possono essere usate come strumento di previsione del danno sismico. Infatti, conoscendo

o ipotizzando la severità dell'azione sismica in termini di MSD, la funzione Probit relativa al livello di danno cumulativo per ogni tipologia di edilizia (T1, T2 ecc.) può essere calcolata utilizzando l'Eq. (6) della Tabella 5. La percentuale cumulativa di ogni soglia di danno può essere ottenuta dalle rispettive unità Probit (Y_{Pr}) utilizzando le Eq. (1) oppure (2). La percentuale di ogni singolo grado di danno della scala EMS-98 (G_k), si può stimare come segue (Grimaz, 2009):

$$P_{\%}(G_k|T_j) = P_{\%}\left(Y_{Pr \geq G_k|T_j}\right) - P_{\%}\left(Y_{Pr \geq G_{k+1}|T_j}\right) \quad (7)$$

per $k = 3, 4$

$$P(G_k|T_j) = P_{\%}\left(Y_{Pr \geq G_k|T_j}\right) \quad (8)$$

per $k = 5$ e $5+$

dove:

$P_{\%}$ è la percentuale di edifici aventi un grado di danno G_k

G_k è il k-mo grado di danno nella scala EMS-98

T_j è la tipologia ($j=1..6$)

$Y_{Pr \geq G_k|T_j}$ è la soglia di danno $Y_{Pr} \geq G_k$ per la tipologia edilizia T_j .

La percentuale di edifici aventi un danno di grado minore o uguale a G_3 può essere ottenuto dall' Eq. (7).

$$P_{\%}(G_{\leq 3|T_j}) = 100 - \sum_{k=4}^5 P_{\%}\left(Y_{Pr G_k|T_j}\right) \quad (9)$$

L'Eq. (9) può essere dunque utilizzata per una rapida stima degli edifici che ragionevolmente mantengano la loro utilizzabilità o che siano rapidamente ripristinabili dopo il terremoto. Altrimenti l'Eq. (8) può essere utilizzata per stimare la percentuale di edifici con media e alta probabilità di provocare vittime, ponendo $k = 5$ e $k = 5+$ rispettivamente.

7 TEST DI VALUTAZIONE PREDITTIVA DEI DANNI PRIMARI (O DIRETTI)

Al fine di testare la possibilità dell'impiego delle equazioni Probit per scopi predittivi, due comuni sono stati considerati come *test-sites*: Taipana (UD) (zona montana) e Pordenone (PN) (zona di pianura) (Figura 3).

La scelta dei comuni test è stata fatta in modo tale che questi presentassero un numero sufficiente di edifici danneggiati per ciascuna tipologia edilizia, al fine di garantire la significatività del test (Tabella 6).

Le equazioni Probit sono state applicate ad entrambi i comuni derivando le percentuali di danneggiamento per le diverse tipologie esistenti, utilizzando come azione di riferimento quella effettivamente registrata nel terremoto del 1976. Al fine di garantire la significatività sono state analizzate solamente le tipologie con più di 30 edifici danneggiati (campi non evidenziati in grigio, Tabella 6).

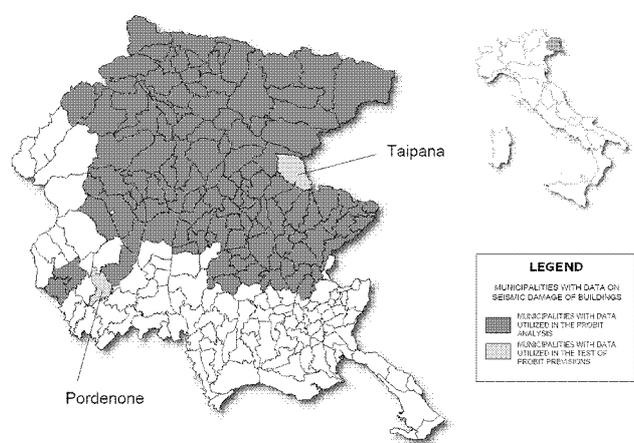


Figura 3. Comuni utilizzati come siti test per l'applicazione della stima degli scenari di danni nell'analisi Probit.

Tabella 6. Numero di edifici per categoria, per i due comuni test.

Comuni	I _{MSK}	MSD	pietrame			laterizio			totale
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Taipana (UD)	VIII-IX	8.5	532	130	37	15	8	19	741
Pordenone (PN)	VII	7	219	49	35	110	15	55	483

In grigio le tipologie con meno di 30 edifici

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 7 per le tipologie in muratura di pietrame, e in Tabella 8 per le tipologie in laterizio. Le tabelle mostrano deviazioni tra scenario di danno osservato e previsto inferiori al 10%, dimostrando che lo strumento può essere un valido supporto di previsione dei danni strutturali (o diretti) su scala territoriale.

8 TEST DI VALUTAZIONE PREDITTIVA DEI DANNI SECONDARI (O INDIRETTI)

Le previsioni fatte con l'analisi Probit (utilizzando la scala EMS-98) per quanto riguarda lo scenario di danno diretto possono consentire di fare previsioni anche sul danno indiretto, cioè sull'agibilità, sulla ripristinabilità, e sulla possibilità di registrare delle vittime ecc.

Grimaz et al. (1996) hanno inizialmente calibrato sul terremoto del Friuli del 1976 un metodo di stima dei suddetti danni. In particolare, è stato sviluppato un sistema esperto per la valutazione dei danni di edifici in zona sismica basato su criteri funzionali e su una scala di Giudizio Sintetico del Danno (GSD). Tale scala permette di correlare il danno fisico con le conseguenze indirette, inoltre può anche essere messa in relazione ai livelli di danno assegnato nel corso delle ispezioni dopo il terremoto del Friuli del 1976 (classificazione dei danni Fr.ED), e alla scala di danno EMS-98 (Grünthal, 1998).

In seguito al terremoto Umbria Marche 1997 (Di Fant, 2006) il metodo è stato successivamente validato su un più ampio set di dati relativo alle schede AeDES. Questo ha permesso di ricavare la matrice di correlazione riportata in Figura 4 che consente, partendo dal danno fisico atteso, di fare una proiezione sui danni indiretti.

Applicando questa matrice, a partire dai danni diretti stimati con le curve di Probit per Pordenone e Taipana si sono fatte delle proiezioni sui danni indiretti.

Al riguardo si è osservato che dopo il terremoto, nel Comune di Taipana sono stati registrati 984 senzatetto vs 1215 abitanti, corrispondenti ad una percentuale di circa il 79% della popolazione locale. Non sono state registrate vittime. Le previsioni ottenute dal modello Probit, utilizzando la scala delle correlazioni GSD, stima una percentuale di circa il 94% di edifici inagibile. Considerando che circa il 12% degli edifici di Taipana non erano abitati, la previsione è in ottimo accordo con quanto osservato (si veda Tabella 7). Per quanto riguarda Pordenone le previsioni del modello Probit (Tabella 8) mostrano che la totalità dei livelli di danno previsto sono entro i livelli G3, quindi, la quasi totalità degli edifici è rapidamente ristrutturabile e non c'è alcun senzatetto. Previsioni confermate dai dati delle registrazioni.

Tabella 7. Confronto tra danno osservato su edifici in pietrame e relativa previsione mediante modello Probit.

Edifici in muratura di pietrame							
Tipologia	Grado EMS 98	comuni					
		Taipana			Pordenone		
		Osservati (%)	Previsione (%)	Deviaz. (%)	Osservati (%)	Previsione (%)	Deviaz. (%)
T1	≤G3	71.6	74.3	2.7	97.2	95.7	-1.5
	G4	11.7	9.9	-1.8	0.5	2.0	1.5
	G5	16.7	15.8	-0.9	2.3	2.3	-0.3
	<i>dei quali G5⁺</i>	<i>(1.9)</i>	<i>(1.9)</i>	<i>0.0</i>	<i>(0.5)</i>	<i>(0.3)</i>	<i>-0.2</i>
T2	≤G3	88.5	86.1	-2.4	100.0	98.5	-1.5
	G4	9.2	7.0	-2.2	0	0.9	-0.9
	G5	2.3	6.9	4.6	0	0.6	-0.6
	<i>dei quali G5⁺</i>	<i>(0.8)</i>	<i>(1.0)</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>(0.3)</i>	<i>0.3</i>
T3	≤G3	83.8	88.2	4.4	91.4	98.5	7.1
	G4	8.1	6.4	-1.7	5.7	0.7	-5.0
	G5	8.1	5.4	-2.7	2.9	0.8	-7.1
	<i>dei quali G5⁺</i>	<i>0</i>	<i>(0.9)</i>	<i>0.90</i>	<i>0</i>	<i>(0.2)</i>	<i>0.2</i>

Tabella 8. Confronto tra danno osservato su edifici in muratura di laterizio e relativa previsione mediante modello Probit.

Edifici in muratura di laterizio				
Tipologia	Grado EMS 98	Pordenone		
		Osservati (%)	Previsione (%)	Deviaz. (%)
T4	≤G3	100.0	98.5	-1.5
	G4	0	0.7	-0.7
	G5	0	0.8	-0.8
	<i>dei quali (G5⁺)</i>	<i>0</i>	<i>(0.2)</i>	<i>0.2</i>
T6	≤G3	100.0	99.5	-0.5
	G4	0	0.2	-0.2
	G5	0	0.3	-0.3
	<i>dei quali (G5⁺)</i>	<i>0</i>	<i>(0)</i>	<i>0.0</i>

Le previsioni sono pertanto in buon accordo con quanto è stato effettivamente osservato, almeno per quanto riguarda i danni indiretti.

Giudizio Sintetico Di Danno edifici in muratura - scala GSD (comparato con Fr.E.D. e la scala di danno EMS98)											
Indice Isp	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Parametro principale											
Strutture verticali	ND	LC	MC		HC	LPC	SPC	TCV			
Parametri supplementari											
Strutture orizzontali	ND	SLC	MLC		HLC	LPC	SPC	TCH			
Tetto	ND		DT		SC	PCR	TCR				
Indicatore/derivati											
Riparabilità	NN			RT		RP	NS	NP			
Agibilità	US	UNW		USW			NU				
Probabilità vittime interne			N			L	M				
Probabilità vittime esterne			N			L	M				
Grado di danno Fr.E.D.		BN		TR		PR	NR		D		
Grado EMS 98	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(10)

INTERPRETAZIONE DEL GRADO DI DANNO GSD		
STRUTTURE VERTICALI	STRUTTURE ORIZZONTALI	TETTO
ND Nessun danno	ND Nessun danno	ND Nessun danno
LC Lesioni capillari	SLC Piccole scemenzioni	DT Danno all'ultimo piano
MC Lesioni medie	MLC Scemenzioni moderate	SC Scemenzioni della struttura
HC Lesioni importanti	HLC Forti scemenzioni	PCR Parziale collasso del tetto
LPC Collasso locale parziale	LPC Collasso locale parziale	TCR Totale collasso del tetto
SPC Collasso significativo	SPC Collasso significativo	
TCV Collasso totale	TCH Collasso totale	

VALUTAZIONE CONSEGUENZE GSD		
RIPARABILITA'	USABILITA'	PROBABILITA' DI VITTIME
NN Non necessaria	US Agibile	inside outside
RT Riparabile	UNW Agibile dopo interventi non strutt.	N Trascurabile N Trascurabile
RP Riparabile parzialmente	USW Agibile dopo interventi strutturali	L Basso L Basso
NS Non riparabile	NU Inagibile	M Medio M Medio
NP Non praticabile		H Alto H Alto

ALTRE SCALE DI DANNO	
Fr.E.D.	EMS98
BN Riparazione non necessaria	1 Danni trascurabili o lievi
TR Totamente riparabile	2 Moderatamente danneggiato
PR Parzialmente riparabile	3 Substantial to heavy damage
NR Non riparabile	4 Parzialmente danneggiato
D Distrutto	5 Distrutto (dove 5* indica la totale distruzione)

Figura 4. Giudizio sintetico dello scenario di danno su edifici in muratura – scala GSD (da Grimaz et al., 1996 mod.)

9 CONCLUSIONI

Dalla serie di dati raccolti dopo il terremoto del 1976 in Friuli, è stata derivata una serie di equazioni Probit, che definiscono le curve di vulnerabilità per varie tipologie di edifici in muratura.

Le equazioni di Probit ricavate a livello regionale sono state testate in termini predittivi su siti-test. I risultati ottenuti indicano che tali equazioni possono essere utilizzate per una rapida valutazione del rischio sismico in aree che presentano tipologie di edifici in muratura simili a quelle esaminate. Tuttavia, la variabilità delle tipologie di costruzione sul territorio è grande e potrebbe essere opportuno studiare altre serie di dati al fine di ricavare un modello Probit per altre tipologie costruttive.

I buoni risultati ottenuti nei test e la relativa semplicità di calcolo indicano che questo tipo di strumento potrebbe essere implementato in un GIS come un *tool* che consenta in modo relativamente rapido di formulare previsioni di scenari di danno su scala territoriale. La variabile MSD, rispetto alla quale sono espresse le equazioni di Probit può essere direttamente derivata dai parametri *ground-motion* forniti dalle mappe di pericolosità sismica disponibili.

L'uso combinato delle scale GSD ed EMS-98 consente la rapida previsione degli scenari di danno anche in termini di conseguenze indirette.

Queste metodologie si candidano quindi come utile strumento per la stima degli scenari di danno diretti ed indiretti, partendo da una base dati anche riferita ad ambiti territoriali, come è il caso dei dati ISTAT.

Allo stato attuale il Probit unitamente all'impiego della scala GSD, sono utilizzati per l'aggiornamento della mappa del rischio del Friuli Venezia Giulia per conto della Direzione Regionale della Protezione Civile della Regione Friuli Venezia Giulia.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la Regione per i dati Fr.E.D., E. Di Fant per l'elaborazione di parte dei dati e il prof. M. Ruscetti per le utili discussioni.

BIBLIOGRAFIA

- Aldrich J.H e Nelson, F.D., 1984. Linear probability, Logit and Probit models. Quantitative applications in the social sciences. *SAGE University paper*, **45**, SAGE Publication Inc. USA.
- Cabanas L., Belen B., Herráiz M., 1997. An Approach to the potential structural damage of earthquake ground motion. *Earthquake engineering and dynamics*, 1(26), pg 79-92.
- Carniel. R., Cecotti C., Chiarandini A., Grimaz S., Picco E., e Ruscetti M., 2001. A definition of seismic vulnerability on a regional scale: the structural typology as a significant parameter. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **42**, 1-2, pp. 137-157.
- CCPS, 2000. Effect models in Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. *American Institute of chemical Engineers*, 2nd Ed., New York pp. 244-249
- Di Cecca M., Grimaz S. 2008. The new Friuli Earthquake Damage Database (Fr.E.D.). *Boll. Geof. Teor. Appl.* In fase di pubblicazione.
- Di Fant E., 2006. Valutazione degli scenari di danno e di agibilità di centri urbani, finalizzati alla pianificazione e gestione dell'emergenza post sismica, in base allo studio dei dati del terremoto Umbria Marche 1997. *Università degli Studi di Udine*. Tesi di Laurea. Relatore S. Grimaz

- Faccioli, E. e Cauzzi, C.; 2006. Macro seismic intensities for seismic scenarios, estimated from instrumentally based correlations, *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, September 3-8, 2006, Geneva, Switzerland
- Finney D.J., 1971. Probit Analysis. *Cambridge University Press*.
- Giovinazzi S., Lagomarsino S., 2006. Vulnerability Methods and Damage Scenario for Seismic Risk Analysis as Support to Retrofit Strategies: an European Perspective. *Paper 14, NZSEE Conference 2006*
- Giorgetti F., 1976. Isoleismal map of the May 6, 1976 Friuli Earthquake. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **19**, pp. 707-714.
- Grimaz S., 1993. Valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura appartenenti ad aggregati strutturali sulla base di analisi a posteriori. *Ingegneria Sismica n. 3/93*– Patron, Bologna, pp. 12-22.
- Grimaz S., Meroni F., Petrini V., Ranù G., Tomasoni R., e Zonno G., 1996. Expert system for Damage assessment of buildings in seismic areas. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie Volume 12*. Luxembourg.
- Grimaz S., Meroni F., Petrini V., Tomasoni R., Zonno G., 1997. Il ruolo dei dati di danneggiamento del terremoto del Friuli nello studio di modelli di vulnerabilità sismica degli edifici in muratura. in *La scienza e i terremoti* – Forum editore, Udine, pp. 89-96.
- Grimaz S., 2009. Seismic damage curves of masonry buildings from Probit analysis on the data of the 1976 Friuli earthquake (NE of Italy). *Boll. Geof. Teor. Appl.* Accettato.
- Grünthal G., 1998 (editor). European Macro seismic Scale 1998. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie Volume 15*. Luxembourg
- Lagomarsino S., 1999. Damage survey of ancient churches: The Umbria-Marche experience. In *Seismic Damage to Masonry Buildings*. Bernardini A. Editor Balkema, Rotterdam. pp. 81-94.
- Lees, F.P., 1996. Loss prevention in the process industries, 2nd Edition Oxford, UK, Butterworth-Heinemann
- Musson R.M., Grünthal G. e Stucchi M.; 2006. Conversion between older intensity scales and EMS-98. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Abstract Book, EHT, Zuerich, p.9.
- Ruscetti M., Carniel R., e Cecotti C., 1997. Seismic vulnerability assessment of masonry buildings in a region of moderate seismicity. *Annali di Geofisica*, **40**, pp. 1405-1413.
- Slejko D., Rebez A. e Santulin M., 2008. Seismic hazard estimated for Vittorio Veneto Broader area. in *Seismic damage scenarios in the Venetia-Friulian area*. *Boll. Geof. Appl.*, **49**, pp. 329-356.
- Spence, R., Coburn, A., Sakai, S. e Pomonis, A., 1991. A parametreless scale of seismic intensity for use in seismic risk analysis and vulnerability assessment. In *SECED (ed), Earthquake, Blast and Impact, Elsevier*, pp 19-30
- Vilchez, J. A., Montinel, H., Casal, J., Arnaldos, J., 2001. Analytical expression for the calculation of damage percentage using the Probit methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**, pp. 193-197.