

# Sviluppo di una nuova procedura per il rilievo del danno delle chiese nella fase di post-terremoto

Sergio Lagomarsino, Serena Cattari, Daria Ottonelli, Sonia Giovinazzi  
*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale. Via Montallegro 1, 16145 Genova.  
University of Canterbury, Christchurch, New Zealand*

*Keywords: Chiese, muratura, rilievo del danno*

## ABSTRACT

La scheda per il rilievo del danno delle chiese a 28 meccanismi, adottata ufficialmente tramite D.P.C.M. a livello italiano, ha trovato largo impiego anche alla scala internazionale ed è stata testata a seguito di numerosi terremoti. Sebbene l'approccio generale basato sulla scomposizione in macroelementi abbia trovato larga conferma, sono emerse alcune criticità in relazione alla sua versatilità e all'affidabilità degli indici di danno ottenibili: il rilievo del danno di 48 chiese in muratura colpite dalla sequenza sismica di Canterbury del 2010-2011 ha rappresentato una delle più recenti esperienze a scala internazionale per analizzare tali aspetti. Partendo dalle criticità emerse, è stata sviluppata una nuova procedura per la valutazione del danno delle chiese in muratura, ancora basata sull'approccio a macroelementi ma che considera in maniera disgiunta i macroelementi e le modalità di danno potenzialmente attivabili. A ciascun macroelemento è associato un peso, relativo alle sue dimensioni rispetto al manufatto globale, e ciascun meccanismo è analizzato considerando anche la direzionalità dell'azione sismica. A partire da tali dati si definisce dapprima un livello di danno locale del macroelemento da cui si ottiene il livello di danno della chiesa attraverso la media pesata dei danni dei singoli macroelementi, seguendo opportune regole di combinazione.

## 1 INTRODUZIONE

È noto come la risposta sismica delle chiese in muratura possa essere analizzata seguendo un approccio a macroelementi (Doglioni et al. 1994), ossia porzioni del manufatto (composte generalmente da uno o più elementi strutturali) che manifestano meccanismi di collasso sostanzialmente autonomi rispetto al resto del manufatto. La ricorrenza delle modalità di danno che li caratterizzano è stata infatti confermata in numerosi terremoti anche al variare di chiese realizzate in epoche e con tecnologie, dimensioni e forme differenti.

L'osservazione dei danni post-terremoto ha portato nel 1987 alla formulazione di una prima scheda, che ha sintetizzato e schematizzato le modalità di collasso fondamentali delle chiese, fissandone un numero specifico. Tale scheda è stata collaudata in Emilia Romagna nel 1987 dopo il terremoto di Parma del 1986 e successivamente, dopo essere stata migliorata ed integrata, è stata adottata anche per i rilievi del danno relativi ai terremoti del 1996 in Emilia Romagna, del 1997 in Umbria e Marche e del

1998 nel Pollino. Successivamente le schede di rilevamento dei danni ai beni mobili ed immobili appartenenti al patrimonio culturale nazionale sono state approvate con Decreto Interministeriale del 3 maggio 2001, pubblicato sulla G.U. del 21 maggio 2001 n. 116. Le schede sono state successivamente utilizzate per i rilievi dei terremoti del 2002 in Molise e Puglia e nel 2004 in provincia di Brescia. In seguito, sono stati proposti degli aggiornamenti e delle integrazioni alle schede di rilievo che sono state nuovamente approvate con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 23 febbraio 2006, pubblicato sulla G.U. del 7 marzo 2006 n. 55. Tale percorso ha così portato all'adozione di una scheda per le chiese che è passata ad una sezione del danno costituita dapprima da 18 meccanismi ed infine da 28.

Sebbene l'applicazione di quest'ultimo strumento per il rilievo del danno delle chiese a eventi sismici recenti in diversi contesti - non solo italiani ma anche a scala internazionale - (Guerreiro et al. 2000, Lagomarsino 2012, Magalhães et al. 2012, Leite et al. 2013 e Sorrentino et al. 2014) abbia confermato

l'affidabilità dell'approccio a macroelementi e la ricorrenza dei meccanismi individuati in tale forma di indagine, alcuni svantaggi sono emersi nella sua capacità di tenere debitamente conto del ruolo dei picchi di danno locali e nella sua versatilità per essere applicato anche in paesi diversi dall'Italia dove è stata sviluppata.

Traendo spunto dall'esperienza dei decenni scorsi, è stata sviluppata una nuova scheda per il rilievo del danno delle chiese in muratura che è presentata nel seguito contestualmente alla sua applicazione alle chiese colpite dalla sequenza sismica di Canterbury (Nuova Zelanda) nel 2010-2011.

## 2 LA SCHEDA CHIESE A 28 MECCANISMI

La scheda chiese italiana (D.M. del 23 febbraio 2006, pubblicato sulla G.U. no.55 del 7 marzo 2006) è basata sulla definizione di 28 meccanismi di collasso finalizzata ad interpretare il comportamento sismico di chiese con differenti stili architettonici e configurazioni sulla base di un approccio a macroelementi. I meccanismi - *individuati a priori nella scheda* - combinano le modalità di danno osservate con maggiore ricorrenza con i macroelementi che usualmente sono presenti nelle chiese (facciata, aula, transetto, arco trionfale, cupola, abside, copertura, cappelle e corpi annessi, aggetti e campanile): ad esempio il no.1 riguarda il "ribaltamento della facciata" ed il no.2 "i meccanismi della sommità della facciata".

In particolare, la scheda si articola in tre parti distinte: la prima dedicata alla conoscenza generale della fabbrica; la seconda destinata alla definizione di un giudizio sul danno della chiesa; la terza infine è una sezione libera, per inserire quelle informazioni non schematizzabili nelle sezioni precedenti. Concentrandosi sulla seconda sezione, la valutazione deve essere effettuata in relazione a 5 livelli di danno, graduati dal livello "0" corrispondente all'assenza di danno sino al livello "5" relativo al completo collasso in accordo con la Scala Macrosismica Europea, EMS98 (Grünthal 1998). Si sottolinea come l'attribuzione del livello del danno sia funzione del riconoscimento del meccanismo di danno attivato dal terremoto e alla sua severità e pericolosità in relazione al collasso locale, più che a precisi criteri in relazione all'ampiezza delle lesioni (sebbene evidentemente questo aspetto incida implicitamente sul primo).

Il primo passo della valutazione risiede quindi nell'individuazione dei meccanismi potenzialmente attivabili (tra i 28 proposti) per il

bene in esame, ai quali attribuire il relativo livello di danno ( $d_k$ ), il cui riconoscimento è supportato da un abaco mirato a schematizzare le sue modalità più ricorrenti. E' possibile poi computare un indice di danno globale ( $i_d$ ) dell'intero manufatto, come media normalizzata funzione dei pesi assegnati ( $\rho_k$ ) e dei livelli di danno associati a ciascun meccanismo:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^N \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^N \rho_k} \quad (1)$$

essendo la sommatoria estesa agli  $N$  meccanismi individuati come potenzialmente attivabili per il manufatto in esame.

I pesi sono fissi e posti uguale a 1 per i macroelementi più importanti, mentre per quelli secondari (relativi a protiro - narcece, transetto, cappelle) è proposto un intervallo tra 0.5-1 rispetto al quale il rilevatore può far variare l'importanza del macroelemento all'interno del manufatto.

La scheda è poi strutturata in modo tale da fornire una grande fonte di informazioni: sull'agibilità in fase emergenziale, sulle opere provvisoriale e sulle perdite economiche, formulando in sintesi una prima diagnosi della risposta strutturale del bene.

Inoltre si sottolinea come tale scheda sia correlata anche ad un modello di vulnerabilità, attraverso l'attribuzione a ciascun meccanismo di opportuni indicatori di vulnerabilità e fattori di presidio. Esso è stato originariamente proposto in Lagomarsino e Podestà (2004) e attualmente adottato nelle "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" (2011).

### 2.1 Criticità emerse nella sua applicazione: l'esempio delle chiese in muratura neozelandesi

Dalle applicazioni della scheda chiese italiana a 28 meccanismi nel contesto italiano ed estero, sono emerse alcune criticità che costituiscono la motivazione alla formulazione della metodologia proposta nel §3.

In particolare tali criticità riguardano:

- l'affidabilità del valore dell'indice di danno globale in relazione all'effettivo danno occorso: in particolare, l'attuale metodo tende a portare a valori dell'indice di danno piuttosto modesti anche in presenza di danni molti gravi. Su questo appare rilevante il ruolo dei picchi di danno che possono occorrere nei diversi

macroelementi, di cui allo stato attuale non si tiene debitamente conto;

- la flessibilità dello strumento nel tenere conto della presenza di macroelementi e relativi meccanismi non caratterizzanti la tipologia italiana che invece assumono un ruolo più importante in altri contesti (ad esempio la cappella e il narcece per le chiese neozelandesi o il coro per le chiese portoghesi). Essendo elementi secondari in Italia, essi sono caratterizzati da un minor peso avendo un solo meccanismo associato; al contrario questi elementi potrebbero assumere una rilevanza maggiore al variare di diverse configurazioni architettoniche ricorrenti. Ad esempio in Magalhães et al. 2012, si sottolinea come sia stato indispensabile aggiungere il macroelemento coro, così diventato il 29 meccanismo, poiché associato sempre ad un danno molto severo. Conseguentemente se si fosse tralasciato il danno subito da tale macroelemento quello globale sarebbe stato sottostimato.

Un caso su cui gli Autori hanno lavorato recentemente e che ha consentito di evidenziare ulteriormente tali problematiche è costituito dall'applicazione della scheda chiese italiana al caso neozelandese. Il terremoto di Canterbury (protrattosi tra il 2010 e 2011 con diversi eventi significativi) ha causato danni ingenti e collassi al patrimonio architettonico di Christchurch come evidenziato in Anagnostopoulou et al (2010), Ingham et al (2012), Leite et al (2013) e Lourenco et al (2013). In particolare le conseguenze sulle chiese sono state particolarmente significative, rendendo l'84% e l'81% delle chiese in muratura di pietra e mattoni, rispettivamente, inaccessibili alla comunità (Leite et al. 2013). Tali evidenze hanno, da un lato, riconfermato come le chiese rappresentino una tipologia costruttiva particolarmente vulnerabile all'azione sismica rispetto ad altre e spinto, dall'altro, ad una loro più approfondita conoscenza tipologica, in termini di materiali, caratteristiche costruttive e della morfologia, e un rilievo del danno post-sismico accurato, per delinearne le vulnerabilità intrinseche e le criticità.

Come anticipato precedentemente, l'impiego della scheda chiese italiana ha riportato in molte situazioni a risultati ambigui e poco soddisfacenti. Tendenzialmente gli indici di danno risultanti sono stati bassi nonostante l'evidenza di danni

locali (su specifici macroelementi) molto consistenti. Ne è un esempio la chiesa di St. Joseph a Lyttleton che ha riportato numerosi collassi locali, ad esempio nella facciata e nel transetto, per la quale tuttavia l'indice di danno della scheda italiana è risultato solo pari a 0.43 (Figura 1).



Figura 1. Chiesa di St. Joseph Aprile 2011.

Anche nell'applicazione portoghese (Magalhães et al. 2012), si sottolinea come gli indici di danno ottenuti siano piuttosto modesti. In particolare, sono stati ottenuti indici di danno maggiori o uguali a 0.3 (soglia oltre cui la chiesa si considera non sicura in termini di agibilità) in solo due delle sedici chiese analizzate a fronte di danni piuttosto significativi in diversi casi.

### 3 FORMULAZIONE DELLA NUOVA SCHEDA CHIESE PER IL RILIEVO DEL DANNO POST-TERREMOTO

La procedura si basa sulla definizione disgiunta dei macroelementi (Tabella 1), in cui la chiesa può essere scomposta (Figura 2), e le modalità di danno che possono essere potenzialmente attivabili al variare di diverse morfologie in diversi macroelementi. Dalla combinazione di questi ultimi con le modalità di danno, sono definiti i meccanismi di collasso, tra cui quelli presenti nella scheda a 28 meccanismi.

Nello specifico sono state identificate dieci modalità di danno elencate in Tabella 2 e rappresentate graficamente in Tabella 3 al variare della loro associazione ad alcuni dei macroelementi individuati. La distinzione tra macroelementi e modalità di danno rende la nuova scheda più versatile e flessibile superando la definizione a priori di predefiniti meccanismi come previsto invece dalla scheda a 28 meccanismi.

L'applicazione della scheda proposta è basata sui seguenti passi:

1. Identificazione dei macroelementi presenti ( $i = 1 \dots N$ );
2. Individuazione del macroelemento più importante all'interno del manufatto, a cui si associa un peso ( $w_i$ ) uguale a 1. In

seguito si assegnano i pesi (inferiori a 1) agli altri macroelementi, in funzione delle dimensioni in pianta e in elevato del macroelemento rispetto alle dimensioni globali della chiesa e in relativo rispetto al macroelemento più importante;

3. Identificazione delle modalità di danno attivabili per i diversi macroelementi, considerando la direzionalità della risposta della struttura in base all'azione sismica (se longitudinale o trasversale), definendo così i meccanismi di collasso di ciascun macroelemento;
4. Assegnazione del livello di danno per ciascun meccanismo attivabile nel macroelemento;
5. Calcolo del livello di danno del macroelemento secondo regole di combinazione che considerano i valori di picco ed i valori medi dei diversi meccanismi così come la loro importanza. Si tiene conto inoltre sia della direzionalità che della distinzione fra il danno agli elementi strutturali orizzontali ed il danno a quelli verticali, permettendo così di valutare per ogni macroelemento tre livelli di danno: longitudinale ( $D_{i,L}$ ), trasversale ( $D_{i,T}$ ) e globale ( $D_i$ );
6. Stima del livello e indice di danno medio e di picco della chiesa attraverso rispettivamente: una media pesata dei danni dei singoli macroelementi presenti nella chiesa e il massimo di questi ultimi.

Nel seguito si approfondiscono brevemente i punti dal 2 al 6.

Definendo i pesi associati ai singoli macroelementi (passo 2), il danno globale della chiesa risulta come una media pesata sui singoli macroelementi i quali danni contribuiscono a quello globale in base al loro peso dimensionale. Un ulteriore coefficiente consente di graduare il peso del macroelemento anche in relazione alla sua rilevanza architettonica e artistica (fattori che potrebbero essere rilevanti nel computo delle perdite associate, non solo strettamente economiche). Come anticipato, il procedimento suggerito per l'attribuzione dei pesi consiste nell'assegnare inizialmente peso 1 al macroelemento più importante e pesi minori agli altri macroelementi in relazione ad essa.

Al termine dell'attribuzione dei pesi, si definiscono i meccanismi associati ai diversi macroelementi (passo 3) ponendo attenzione alla direzionalità della risposta: infatti, a seconda della

direzione di analisi, uno stesso macroelemento può esibire modalità di danno diverse. Ad esempio, per la navata centrale, la modalità di danno di "ribaltamento di sistema a più blocchi (no.4)" fa riferimento, in direzione longitudinale, alla risposta del colonnato, in caso di chiesa a più navate, mentre, in direzione trasversale, si riferisce al ribaltamento delle pareti laterali.



Figura 2. Scomposizione della chiesa in macroelementi.

Tabella 1. Identificazione dei Macroelementi.

ID.	Macroelementi
NC	Navata Centrale
NL <sub>DESTRA</sub>	Navata Laterale Destra
NL <sub>SINISTRA</sub>	Navata Laterale Sinistra
F	Facciata
T <sub>DESTRA</sub>	Transetto destro
T <sub>SINISTRA</sub>	Navata Laterale Sinistra
CUP	Cupola
AT	Arco Trionfale
P	Presbiterio
A	Abside
A-N	Atrio / Narcece
C	Cappella
TC	Torre Campanaria
AGG	Aggetti

Tabella 2. Identificazione delle modalità di danno.

ID	Direzione	Modalità di danno
1	L,T	Fuori piano di pareti
2	L,T	Fuori piano di porzioni sommitali
3	L,T	Risposta nel piano
4	L,T	Ribaltamento di sistema a più blocchi
5	L,T	Lesioni a taglio o flessione in strutture monodimensionali
6		Lesioni nelle volte
7		Lesioni nella cupola
8		Interazione tra copertura e pareti
9		Interazione con gli altri edifici o il campanile
10		Ribaltamento di blocchi singoli

Definiti, quindi, i meccanismi attivabili in ciascun macroelemento, si associa ad essi il livello di danno (passo 4) riferendosi ai cinque livelli ( $D_k=0..5$ ) in accordo con la scala EMS98 (Grunthal 1998).

L'indice di danno locale di macroelemento, passo 5, è computato combinando il danno occorso agli elementi strutturali orizzontali e quelli portanti verticali, considerando la direzione trasversale e longitudinale, come i massimi tra i meccanismi corrispondenti attivati. In particolare nel caso in cui il livello di danno degli orizzontamenti sia pari a quello degli elementi strutturali verticali questo viene aumentato di un'unità per tener conto del fatto che la perdita di capacità portante di quest'ultimi può risultare ulteriormente inficiata dalla perdita o degrado di connessione con gli orizzontamenti.

Il passaggio successivo è il calcolo degli indici di danno trasversale ( $D_{i,T}$ ) e longitudinale ( $D_{i,L}$ ) come massimi tra quello orizzontale e quello verticale nelle rispettive direzioni; infine, si ottiene il danno globale del macroelemento ( $D_i$ ) come massimo fra i due precedenti, che opportunamente pesato diventa:

$$\bar{D}_i = w_i D_i \quad (2)$$

In conclusione, per ogni macroelemento, si ottengono tre valori di danno, longitudinale, trasversale e globale, che divisi per 5 e opportunamente pesati, determinano, a livello del macroelemento, i tre indici di danno ( $i_{di,L}$ ,  $i_{di,T}$  e  $i_{di}$ ). Come anticipato al passo 6, a partire dai livelli di danno locali dei macroelementi opportunamente pesati, si computa il livello di danno globale della chiesa come media pesata dei livelli di danno dei macroelementi (Equazione 3). Il peso dei singoli elementi assume in tale fase un ruolo primario.

$$D_{CHIESA} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{D}_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3)$$

Viceversa il livello di danno longitudinale e trasversale, si determina attraverso la seguente relazione:

$$D_{CHIESA,L/T} = \sum_{i=1}^N \delta_{i,L/T} w_i D_{i,L/T} \quad (4)$$

Dove il parametro  $\delta_{i,L/T}$  è definito come:

$$\delta_{i,L/T} = \begin{cases} 0 & \text{Se il macroelemento non ammette meccanismi in direzione L/T} \\ 1 & \text{Se il macroelemento ammette meccanismi in direzione L/T} \end{cases} \quad (5)$$

Il fattore  $\delta_{i,L/T}$  è stato introdotto poichè alcuni macroelementi potrebbero non ammettere meccanismi in una direzione: tipico esempio è il macroelemento arco trionfale (AT in Tabella 1) che non presenta modalità di danno attivabili in direzione longitudinale.

Tabella 3. Abaco dei Meccanismi.

ID	Meccanismo
1	
2	
3	
4	
5	
10	
6	
7	
8	
9	



Infine dai livelli di danno dei singoli macroelementi si calcola il livello di danno di picco della chiesa come massimo di quelli precedenti:

$$D_{CHIESA,PICCO} = \max(\bar{D}_i) \quad (3)$$

I livelli di danno sono poi normalizzati dividendo per 5 portando così ai corrispondenti indici danno compresi tra 0 e 1.

È importante sottolineare che partendo dai dati raccolti con la nuova procedura, è possibile comunque compilare a ritroso anche la scheda chiese italiana GU n. 55, 2006.

Inoltre il metodo proposto presenta la possibilità di una doppia compilazione:

- una più speditiva che necessita l'attribuzione del peso del macroelemento e quella diretta del livello di danno ad esso associato ( $D_k=0...5$ ) in accordo con la scala EMS98 (Grunthal 1998), senza passare attraverso l'analisi più puntuale dei meccanismi di collasso attivati;
- una completa che si basa sull'analisi della risposta di ogni singolo meccanismo associato al macroelemento e l'applicazione delle regole analitiche prima introdotte per il calcolo dell'indice di danno.

#### 4 APPLICAZIONE AL CAMPIONE DI CHRISTCHURCH (NZ)

Nel seguito è illustrata l'applicazione della procedura proposta ad un campione di 48 chiese in muratura colpite dall'evento di sismico di Christchurch, già richiamato al §2.1.

La Figura 3 illustra alcune chiese particolarmente rappresentative delle classi tipologiche presenti in tale territorio: rispetto a quelle più tipiche del contesto italiano ed europeo presentano una configurazione architettonica meno articolata e molto più standardizzata.

La Figura 4 fornisce un quadro dell'indice di danno ottenuto secondo la procedura proposta al variare dei diversi macroelementi presenti nel campione (il valore dell'indice di danno è pesato sulla ricorrenza del macroelemento).

Al fine di verificare se le variazioni introdotte ai metodi attualmente disponibili effettivamente consentissero di ottenere risultati più coerenti, sono stati applicati diversi approcci per il computo/assegnazione del livello del danno globale (Cattari et al. 2015) impiegando:

- i. la scheda chiese italiana a 28 meccanismi, come anticipato nel §2.1, in particolare

nella parte riguardante l'agibilità della struttura e l'identificazione dei meccanismi di collasso attivati, con relativa assegnazione del livello di danno, come descritto più dettagliatamente in Leite et al. (2013);

- ii. un metodo empirico basato sul giudizio esperto, attraverso la assegnazione diretta del livello di danno  $D_k$  ( $k=1...5$ ) in accordo con la scala EMS98 (Grunthal 1998), in base all'osservazione del danno riscontrato nella chiesa, a livello globale e non di singolo macroelemento;
- iii. la procedura ivi proposta al §3.



Figura 3. Pianta e alcune immagini delle configurazioni architettoniche più diffuse delle chiese neo-zelandesi

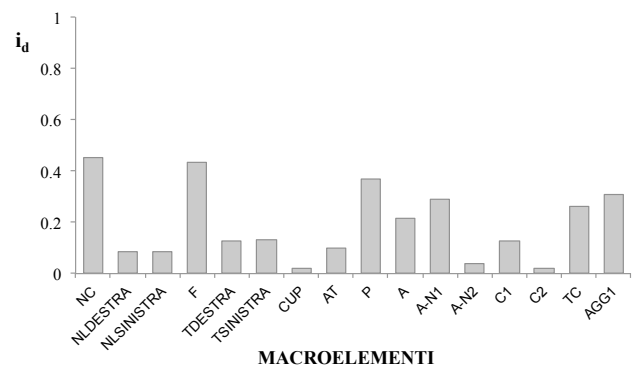


Figura 4. Indice di danno computato per il campione esaminato alla scala di macroelemento (identificato con la sigla presente in Tabella 1).

La Figura 5 mostra il confronto degli indici di danno medio ottenuti dai suddetti metodi.

L'approccio (ii) è il più semplice, rapido e qualitativo: rispetto agli altri due metodi tende a portare a valori maggiori dell'indice di danno ed è fortemente influenzato dall'esperienza dell'operatore. Tale approccio tende ad attribuire un valore di danno globale elevato anche in presenza di un solo macroelemento fortemente danneggiato. L'approccio (i), al contrario, è uno strumento basato un approccio analitico

(ancorché affetto dall'attribuzione del livello di danno a scala di meccanismo influenzata dall'esperienza del compilatore), sufficientemente agile, che necessita però della compilazione integrale della scheda per portare a risultare attendibili e che implica un livello di conoscenza approfondito. Esso tende a sottostimare i danni anche rispetto all'approccio (iii), in quanto quest'ultimo è calibrato maggiormente, rispetto al primo, sui macroelementi realmente presenti in ciascuna chiesa e sui picchi di danno dei diversi macroelementi.

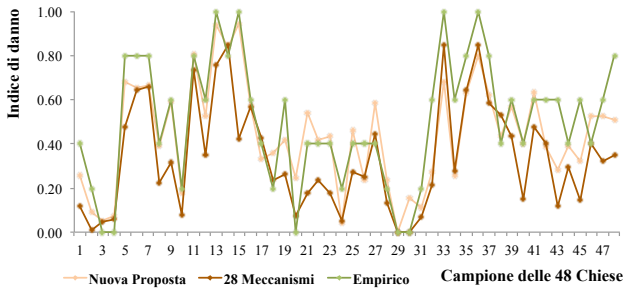


Figura 5. Confronto tra gli indici di danno ottenuti dai diversi approcci.

Come introdotto al §3, il metodo proposto consente di dettagliare il livello di danno anche in relazione alla sua direzionalità e ai picchi locali.

La Figura 6 illustra, per il campione in esame, i valori dell'indice di danno computato in direzione longitudinale e trasversale. Si osserva come la direzione longitudinale presenti tipicamente valori più elevati: questo riflette una maggiore vulnerabilità delle chiese neozelandesi in relazione all'attivazione di meccanismi quali la risposta nel piano delle pareti delle navate (contrastati, nella risposta trasversale, dalla presenza sistematica di contrafforti) e quella fuori dal piano della facciata. Peraltro la significativa vulnerabilità di questi due macroelementi è altresì evidente dagli indici di danno illustrate in Figura 4.

In merito alla valutazione dell'indice di danno di picco, la Figura 8 seguente illustra, a confronto per ciascuna chiesa, il valore dell'indice di danno globale e quello di picco.

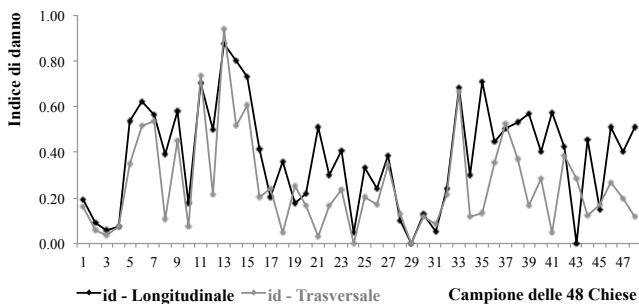


Figura 6. Indici di danno longitudinali e trasversali ottenuti per il campione in esame.



Figura 7. Esempio di danno longitudinale: a) nel piano delle pareti laterali della navata; b) fuori dal piano della facciata.

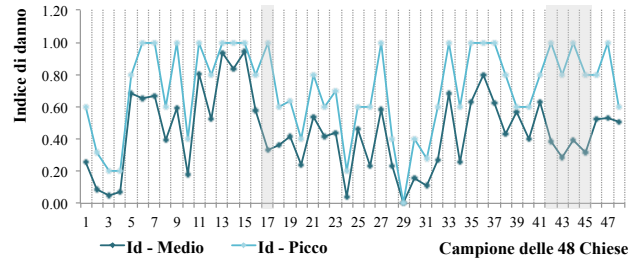


Figura 8. Confronto tra l'indice di danno medio e quello di picco per il campione in esame.

Si sottolinea come le cinque chiese, evidenziate in grigio in Figura 8, presentino una differenza significativa tra l'indice di danno medio e quello di picco. Questa differenza è dovuta al fatto che, in tali chiese, sono presenti macroelementi importanti (come il campanile e la navata centrale) con un indice di danno elevato mentre gli altri macroelementi non sono praticamente danneggiati, come si evince da Figura 9.

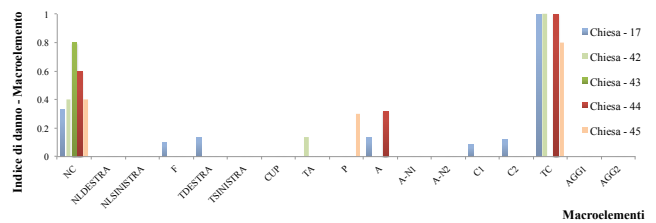


Figura 9. Indici di danno per i diversi macroelementi in 5 chiese del campione in esame.

#### 4.1 Applicazione della procedura proposta alla Chiesa di St. Peter

Per entrare maggiormente nel merito della procedura proposta, a titolo esemplificativo, in Figura 10 è riportata una sintesi delle informazioni, relative alla Chiesa di St. Peter, che si ottengono dall'applicazione del metodo. In particolare si ricorda che:  $w_i$  è il peso attribuito al macroelemento,  $w_i'$  il peso normalizzato, mentre  $D_{i,L}$  e  $D_{CHURCH,L}$  sono il livello di danno longitudinale rispettivamente del macroelemento e della chiesa,  $D_{i,T}$  e  $D_{CHURCH,T}$  quello trasversale,  $D_i$  è il danno locale del macroelemento mentre  $D_{CHURCH}$  è il danno globale della chiesa. Inoltre in Figura 11 è riportata la sezione della scheda

relativa al macroelemento “navata centrale” presente nella Chiesa di St.Peter, in cui: nella prima colonna sono riportati i meccanismi di collasso attivabili nel macroelemento in oggetto (il codice alfanumerico combina infatti la sigla del macroelemento in oggetto - NC - con il numero della modalità di danno – in questo caso 3,4,6,8 e 9); mentre nella seconda colonna, sono elencati i numeri di riferimento dei corrispondenti meccanismi di collasso presenti nella scheda chiese italiana a 28 meccanismi. Si nota come suddetto macroelemento, a cui è stato assegnato un peso pari a 1, nonostante possa subire diversi meccanismi di collasso, ha manifestato solo danni legati alla risposta nel piano con un livello di danno pari a due (Figura 12).

Si riportano, inoltre, le tabelle relative ad altri due macroelementi: facciata e transetto (rispettivamente Figura 13 e Figura 14). La prima, a cui è stato assegnato un peso pari a 0.6, ha subito un'unica modalità di danno relativa alla risposta nel piano della facciata, con un livello di danno pari a due; mentre il transetto, con peso pari a 0.7, ha subito il ribaltamento della parete terminale del macroelemento sia totale (con un livello di danno pari a tre) che solo della porzione sommitale (livello di danno quattro).

MACROELEMENTS		w	w'	D <sub>L</sub>	D <sub>T</sub>	D
NC – CENTRAL NAVE	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.14	2	0	2
NLEFT – LEFT LATERAL NAVES	<input type="checkbox"/>					
NRIGHT – RIGHT LATERAL NAVES	<input type="checkbox"/>					
F – FAÇADE	<input checked="" type="checkbox"/>	0.6	0.09	0	2	2
TLEFT – LEFT TRANSEPT	<input checked="" type="checkbox"/>	0.7	0.1	0	3	3
TRIGHT – RIGHT TRANSEPT	<input checked="" type="checkbox"/>	0.7	0.1	0	3	3
D – DOME	<input type="checkbox"/>					
TA – TRIUMPHAL ARCH	<input type="checkbox"/>	0.5	0.07		0	0
P – PRESBYTERY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2	0.03	0	0	0
A – APSE	<input checked="" type="checkbox"/>	0.8	0.11	2	0	2
AN <sub>1</sub> – ATRIUM/NARTHEX	<input checked="" type="checkbox"/>	0.8	0.11	0	0	0
AN <sub>2</sub> – ATRIUM/NARTHEX	<input type="checkbox"/>					
C <sub>1</sub> – CHAPELS	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	0.07	2	4	4
C <sub>2</sub> – CHAPELS	<input type="checkbox"/>					
C <sub>3</sub> – CHAPELS	<input type="checkbox"/>					
BT – BELL TOWER	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.14	0	0	0
PR <sub>1</sub> – PROJECTIONS	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2	0.03	3	0	3
PR <sub>2</sub> – PROJECTIONS	<input type="checkbox"/>					
PR <sub>3</sub> – PROJECTIONS	<input type="checkbox"/>					
				D <sub>CHURCHL</sub> 0.65	D <sub>CHURCHT</sub> 1.16	D <sub>CHURCH</sub> 1.76

Figura 10. Lista dei macroelementi presenti nella Chiesa di St.Peter associati ai relativi pesi e danni ottenuti.

NC – CENTRAL NAVE	<input checked="" type="checkbox"/>	w <sub>NC</sub> = 1
Nc3(L) – cracks due to the in-plane response of side walls	6	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Nc4(L) – longitudinal response of the colonnade (in the case church with lateral naves)	7	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Nc4(T) – transversal response of the nave with overturning of the side walls	5	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Nc6 – damage in the vaults of the central nave	8	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Nc8 – damage at the connection between roof and side walls	19	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Nc9 – damage in the nave due to interaction with other buildings or the bell tower	25	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
· Nc(H) = max(Nc6,Nc8) = 2		
· Nc(V) <sub>L</sub> = max(Nc3(L),Nc4(L)) = 2 if Nc(V) <sub>L</sub> = Nc(H) → Nc(V) <sub>L</sub> = Nc(H)+1		DNc <sub>L</sub> = max[Nc(V) <sub>L</sub> , Nc(H)] = 2
· Nc(V) <sub>T</sub> = Nc4(T) = 0 if Nc(V) <sub>T</sub> = Nc(H) → Nc(V) <sub>T</sub> = Nc(H)+1		DNc <sub>T</sub> = max[Nc(V) <sub>T</sub> , Nc(H)] = 0
· Nc(V) = max(Nc(V) <sub>L</sub> ,Nc(V) <sub>T</sub> ,Nc9) = 2		DNc = max[Nc(V), Nc(H)] = 2

Figura 11. Box relativo al macroelemento navata centrale per la Chiesa di St.Peter.



Figura 12. Immagini del danno associato alla risposta nel piano della navata laterale.

F – FAÇADE	<input checked="" type="checkbox"/>	w <sub>F</sub> = 0.6
F1(L) – out-of-plane of the whole façade	1	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
F2(L) – out-of-plane of the gable	2	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
F3(T) – cracks due to the in-plane response of the façade	3	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
F6 – damage in the vaults of the naves close to the façade	8-9	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
F8 – damage at the connection between roof and façade	19	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
F9 – damage due to interaction with other buildings or the bell tower	25	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
· F(H) = max(F6,F8)-1 = 0		
· F(V) <sub>L</sub> = max(F1(L),F2(L)) = 0		DF <sub>L</sub> = max[F(V) <sub>L</sub> , F(H)] = 0
· F(V) <sub>T</sub> = F3(T) = 2		DF <sub>T</sub> = max[F(V) <sub>T</sub> , F(H)] = 2
· F(V) = max(F(V) <sub>L</sub> , F(V) <sub>T</sub> ,F9) = 2		DF = max[F(V),F(H)] = 2

Figura 13. Box relativo al macroelemento facciata per la Chiesa di St.Peter.

TLEFT – LEFT TRANSEPT	<input checked="" type="checkbox"/>	w <sub>T,Left</sub> = 0.7
T1(L) – out-of-plane of the side walls	-	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T3(L) – cracks due to the in-plane response of the end walls	11	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T1(T) – out-of-plane of the end wall	10	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T2(T) – out-of-plane of the gable of the end wall	-	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T3(T) – cracks due to the in-plane response of the side walls	11	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T6 – damage in the vaults of the transept	12	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T8 – damage at the connection between roof and transept	20	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
T9 – damage due to interaction with other buildings or the bell tower	25	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
· T <sub>1</sub> (H) = max(T6,T8) = 0		
· T <sub>1</sub> (V) <sub>L</sub> = max(T1(L),T3(L)) = 0 if T <sub>1</sub> (V) <sub>L</sub> = T(H) → T <sub>1</sub> (V) <sub>L</sub> = T <sub>1</sub> (H)+1		DT <sub>1L</sub> = max[T <sub>1</sub> (V) <sub>L</sub> , T <sub>1</sub> (H)] = 0
· T <sub>1</sub> (V) <sub>T</sub> = max(T1(T),T2(T)-1,T3(T)) = 3 if T <sub>1</sub> (V) <sub>T</sub> = T <sub>1</sub> (H) → T <sub>1</sub> (V) <sub>T</sub> = T <sub>1</sub> (H)+1		DT <sub>1T</sub> = max[T <sub>1</sub> (V) <sub>T</sub> , T <sub>1</sub> (H)] = 3
· T <sub>1</sub> (V) = max(T <sub>1</sub> (V) <sub>L</sub> ,T <sub>1</sub> (V) <sub>T</sub> ,T9) = 3		DT <sub>1</sub> = max[T <sub>1</sub> (V), T <sub>1</sub> (H)] = 3

Figura 14. Box relativo al macroelemento transetto per la Chiesa di St.Peter.





Figura 15. Immagini del danno associato ai meccanismi del transetto della Chiesa di St.Peter.

#### 4.2 Impiego dei dati per la derivazione di curve di vulnerabilità

La definizione di un indice di danno rappresentativo della risposta sismica manifestata dal campione di Christchurch, statisticamente elaborato, ha portato alla formulazione di un indice di vulnerabilità per il campione di chiese in esame e ha permesso la derivazione delle curve di vulnerabilità, attraverso un'opportuna regressione. Le curve di vulnerabilità permettono di correlare il danno alla tipologia costruttiva e geometrica, specifica delle chiese neozelandesi, facendo emergere quei dettagli costruttivi che determinano una vulnerabilità intrinseca dei beni in oggetto. L'identificazione di questi fattori rappresenta un primo passo fondamentale verso lo sviluppo di un modello di vulnerabilità specifico da applicare in Nuova Zelanda per sostenere le politiche di mitigazione del rischio sismico sui beni monumentali in muratura quali le chiese.

In particolare, dall'analisi statistica degli indici di danno sono state definite le matrici di probabilità di danno (DPM), per le Intensità Macrosismiche che variano tra 4-9 della Scala Mercalli (MMI). Tali valori di Intensità sono state computate attraverso un'opportuna legge di calibrazione calibrata a partire dai dati di *PGA* (Peak Ground Acceleration – Accelerazione di picco al suolo) ottenuti dalle mappe sismiche USGS (USGS 2011), a disposizione per ciascun bene.

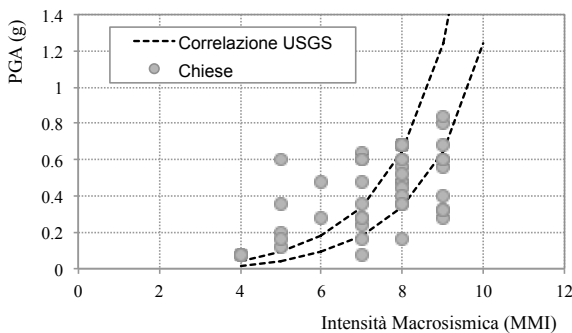


Figura 16. Correlazione tra Intensità e *PGA*.

Per ogni intensità, l'indice di danno medio e la varianza sono stati calcolati per identificare i parametri della distribuzione Beta da cui si sono ricavati i valori della DPM in termini discreti (Figura 17).

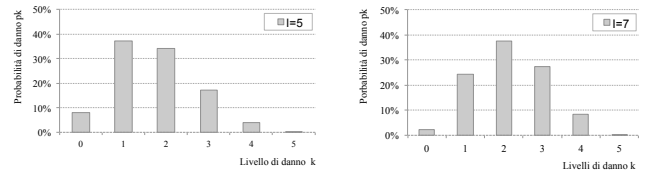


Figura 17. DPM ottenute per il campione di Christchurch per due diverse Intensità.

Inoltre dalle DPM, facendo riferimento al valore medio e ai valori corrispondenti ai frattili 16% e 84%, sono state definite le curve di vulnerabilità empirica delle chiese Neozelandesi. Tali curve sono state confrontate con quelle ottenute per il panorama italiano (Lagomarsino 2006), assumendo diversi valori dell'indice di vulnerabilità  $V_i$ . L'andamento delle curve si dimostra coerente, tra i due campioni, sia per quanto riguarda i valori medi che gli estremi, rappresentanti la condizione di maggiore e minore vulnerabilità.

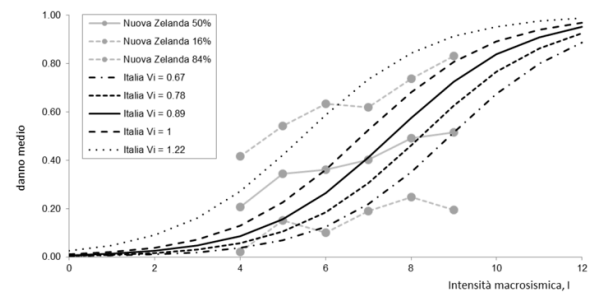


Figura 18. Confronto tra le curve di vulnerabilità per le chiese neozelandesi, ottenute dai dati empirici, e italiane.

## 5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

A partire dai punti di forza della scheda chiese italiana a 28 meccanismi, quali l'approccio a macroelementi ed il carattere speditivo, si propone una nuova procedura per la valutazione del danno delle chiese nella fase di post-emergenza sismica, basata sull'identificazione dei macroelementi e delle modalità di danno cui essi possono essere soggetti. La distinzione tra macroelementi e modalità di danno (senza la definizione a priori di un numero prefissato di meccanismi), dona alla scheda caratteristiche di flessibilità e adattabilità maggiori di quella attuale e conseguentemente, una maggiore efficacia di utilizzo anche in ambito non italiano.

Una prima applicazione al contesto neozelandese ha dimostrato buoni risultati sia in

termini di indice di danno ottenuto che di applicabilità del metodo.

Lo sviluppo di strategie di rilievo e valutazione del danno sempre più accurate, ma allo stesso tempo, di carattere speditivo, costituiscono strumenti di fondamentale importanza in fase emergenziale e per la definizione delle priorità di intervento.

## 6 RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca nasce da una collaborazione tra l'Università di Genova e l'Università di Canterbury, Nuova Zelanda, per la partecipazione al progetto "Seismic Vulnerability of Masonry Churches" finanziato e gestito dall'Earthquake commission (EQC). Gli obiettivi del progetto, a partire dallo studio dell'evento sismico di Canterbury 2011, mirano alla conoscenza tipologica delle chiese neozelandesi in muratura, all'interpretazione del danno subito da esse e alla valutazione della vulnerabilità sismica intrinseca di questa tipologia costruttiva. Il progetto coinvolge, oltre le suddette Università, GNS Science (NZ), l'Università di Auckland (NZ), New Zealand Historic Place Thrust (NZHPT), l'Università di Minho (Portogallo) e New Zealand Ministry of Environment. Leader del progetto è la dott.ssa Tatiana Goded di GNS Science (NZ).

Questa ricerca è stata inoltre parzialmente finanziata dal Progetto esecutivo DPC-ReLUIS III 2014 nell'ambito della Linea Muratura (Coordinatori: Proff. G. Magenes, S.Lagomarsino e C.Modena).

## BIBLIOGRAFIA

- Anagnostopoulou, M., Bruneau, M., Gavin, H.P., 2010. Performance of Churches During the Darfield Earthquake of September 4, 2010, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **43**(4), 374-381.
- Cattari, S., Ottonelli, D., Pinna, M., Lagomarsino, S., Clark, W., Giovinazzi, S., Ingham, J., Marotta, A., Liberatore, D., Sorrentino, L., Leite, J., Lourenco, P.B., Goded, T., 2015. Preliminary results from damage and vulnerability analysis of URM churches after the Canterbury earthquake sequence 2010-2011, *New Zealand Society for Earthquake Engineering Technical Conference*. Aprile 10-12, Rotorua, NZ.
- Dipartimento della Protezione Civile, 2001. *Scheda per il rilievo del patrimonio monumentale - Danno alle chiese*, G.U. n. 116, 21 Maggio 2001.
- Doglion, F., Moretti, A., Petrini, V., Angeletti, P., 1994. *Le Chiese e il Terremoti: Dalla Vulnerabilità Constatata nel Terremoto del Friuli al Miglioramento Antisismico nel Restauro, Verso una Politica di Prevenzione*, Edizioni Lint, Trieste, Italy
- Grünthal, G., 1998. *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Luxembourg, 99 pp.
- Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011. *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*. G.U. 26-2-2011, N. 47 - suppl.ord. N. 54.
- Direttiva P.C.M. 23 febbraio 2006. *Approvazione dei modelli per il rilevamento dei danni, a seguito di eventi calamitosi, ai beni appartenenti al patrimonio monumentale*. G.U. del 7 marzo 2006 n. 55.
- Guerreiro, L., Azevedo, J., Proença, J., Bento, R., Lopes, M., 2000. Damage in Ancient Churches during the 9th of July 1998 Azores earthquake, *XII World Conference on Earthquake Engineering*. January 30–February 4, Auckland, New Zealand.
- Ingham, J.M., Lourenco, P.B., Leite, J., Castelino, S., Colaco, E., 2012. Using simplified indices to forecast the seismic vulnerability of New Zealand unreinforced masonry churches, *Australian Earthquake Engineering Society 2012 Conference*. December 7-9, Gold Coast, Australia.
- Lagomarsino, S., 1998. A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches. *XI European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, A.A. Balkema (CD-ROM), ISBN 90-5410-982-3, p. 67 (12 pages).
- Lagomarsino, S., Podestà, S., 2004. Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis. *Earthquake Spectra*, **20**(2): 395–412.
- Lagomarsino, S., 2006. On the vulnerability assessment of monumental buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **4**: 445-463.
- Lagomarsino, S., 2012. Damage assessment of churches after L'Aquila earthquake (2009), *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**: 73–92.
- Leite, J., Lourenco, P.B., Ingham, J.M., 2013. Statistical assessment of damage to churches affected by the 2010-2011 Canterbury (New Zealand) earthquake sequence, *Journal of Earthquake Engineering*, **17**: 73-97.
- Lourenco, P.B., Oliveira, D.V., Leite, J.C., Ingham, J.M., Modena, C., da Porto, F., 2013. Simplified indexes for the seismic assessment of masonry buildings: international database and validation. *Engineering Failure Analysis*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.014>
- Magalhães, J.M., Vicente, R., Ferreira, T., Varum, H., Costa, A., Lagomarsino, S., Curti, E., 2012. Seismic vulnerability of churches in Faial and Pico islands, Azores, *15th World Conference On Earthquake Engineering*. 24-28 September, Lisbon, Portugal.
- Sorrentino, L., Liberatore, L., Decanini, L.D., Liberatore D., 2014. The performance of churches in the 2012 Emilia earthquakes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **12**: 2299–2331.
- USGS, 2011. US Geological Survey ShakeMap: South Island of New Zealand February 22nd, 2011, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/b0001igm/>