

# Un indice di rischio sismico per le strutture ospedaliere

## A seismic risk index for hospital facilities

Antonietta Aiello<sup>1</sup>, Marisa Pecce<sup>2</sup>, Luigi Di Sarno<sup>3</sup>, Daniele Perrone<sup>4</sup>, Fernando Rossi<sup>5</sup> ■

### Sommario

I più recenti eventi sismici hanno messo in evidenza come molte costruzioni, pur non avendo subito gravi danni strutturali, hanno manifestato significative perdite di funzionalità a causa dei danni agli elementi non strutturali o a problemi di carattere organizzativo. Tale evenienza riveste un ruolo cruciale per le opere di importanza strategica e tra queste prioritariamente gli ospedali. Per queste strutture è ormai ampiamente riconosciuta la necessità di un comportamento sismico adeguato sotto tutti gli aspetti (strutturale, funzionale, organizzativo), da cui l'esigenza di valutare i livelli di rischio sismico degli ospedali esistenti e pianificare gli interventi di adeguamento sismico. Tenuto conto dell'elevatissimo numero di strutture sanitarie presenti sul territorio nazionale, si rende, però, necessaria la definizione di un metodo semplificato in grado di fornire agevolmente degli indici di rischio considerando tutti i fattori che influenzano la risposta sismica complessiva. Nel presente lavoro è proposta una metodologia che consente in modo speditivo la definizione di un indice di rischio su scala territoriale. La scheda proposta è stata applicata a due casi studio, individuando due strutture ospedaliere situate in zone del territorio nazionale con diverso livello di pericolosità sismica.

**Parole chiave:** Rischio sismico, strutture strategiche, ospedali, indice di rischio, vulnerabilità, approccio sistemico.

### Abstract

*Seismic vulnerability assessment is of paramount importance for existing critical structures, e.g. health care centers and hospital buildings. The damage observed during recent earthquakes emphasizes that the vulnerability of hospitals is not influenced merely by the structural system performance. The earthquake performance of hospital buildings is remarkably affected by nonstructural elements, building contents as well as the organization framework of the health care facility. Advanced methods are available nowadays to evaluate the seismic response of hospital buildings; nevertheless, it is often cumbersome and time-consuming to rely on such methods for regional assessment of the seismic risk of health care facilities.*

*The present paper proposed a simplified, yet reliable, methodology, based on questionnaires, to evaluate a Safety Index for hospital buildings. Comprehensive parameters that may affect the vulnerability are taken into account during an on-site survey that may convolute structural, nonstructural and organizational aspects. Additionally, the influence of hazard has been accounted for in an effective manner.*

*The aforementioned method has been applied to two case studies of hospitals located in different seismic areas.*

**Keywords:** Seismic risk, hospital buildings, safety index, vulnerability, systemic approach.

### 1. Introduzione

A seguito di un evento sismico la priorità è quella di salvaguardare le vite umane e assistere i feriti, pertanto le conseguenze del terremoto non si fermano alla fine dell'evento stesso ma si estendono nel tempo anche in base ai danni prodotti sui servizi. Infatti, esistono una serie di strutture che rivestono un ruolo fondamentale nell'emergenza post-sisma e che per tale motivo sono definite di

importanza strategica ai fini della protezione civile. Tra queste strutture gli ospedali occupano un ruolo fondamentale.

Le strutture ospedaliere sono edifici con peculiarità uniche per il loro genere; essi sono caratterizzati da un elevato grado di complessità dovuto alle innumerevoli attività svolte al loro interno. Infatti la presenza contemporanea di molteplici attività all'interno di una struttura sani-

1 Università del Salento Dipartimento di Ingegneria per l'innovazione Lecce, Italia - ✉ [antonietta.aiello@unisalento.it](mailto:antonietta.aiello@unisalento.it);

2 Università del Sannio Dipartimento di Ingegneria Benevento, Italia - ✉ [pecce@unisannio.it](mailto:pecce@unisannio.it)

3 Università del Sannio Dipartimento di Ingegneria Benevento, Italia - ✉ [ldisarno@unisannio.it](mailto:ldisarno@unisannio.it)

4 Università del Salento Dipartimento di Ingegneria per l'innovazione Lecce, Italia - ✉ [daniele.perrone@unisalento.it](mailto:daniele.perrone@unisalento.it)

5 Università del Sannio Dipartimento di Ingegneria Benevento, Italia - ✉ [fernando@unisannio.it](mailto:fernando@unisannio.it)

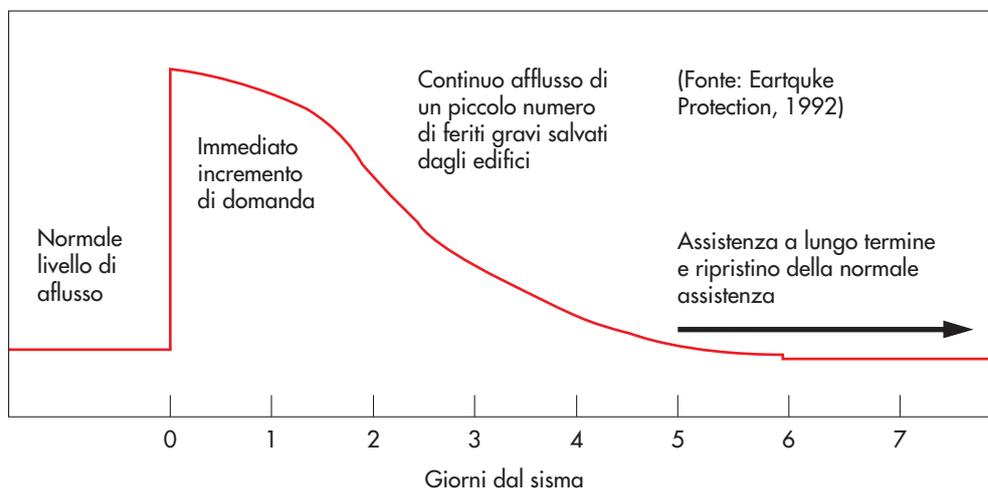
taria e l'esigenza di una loro perfetta integrazione al fine di garantire la piena funzionalità della struttura stessa comporta la necessità di ricorrere ad approcci progettuali diversi da quelli validi per altre tipologie di costruzioni, con l'obiettivo di garantire livelli di sicurezza adeguati alla specificità dell'opera. La specificità delle strutture sanitarie e la consapevolezza di dover affrontare le problematiche progettuali con metodologie più appropriate traspare chiaramente anche dalle normative vigenti (vedi per esempio, FEMA396, 2003; Eurocode 8, 2006; NTC08, 2008; ASCE, 2010) da recenti studi eseguiti e/o ancora in itinere (Bruneau & Reinhorn, 2007; Cimellaro et al., 2010) nonché dalle conseguenze derivanti dagli ultimi eventi sismici nazionali (vedi il caso del terremoto de L'Aquila dell'aprile del 2009 o del recente sisma dell'Emilia-Romagna di maggio 2012) ed internazionali (si prenda per esempio il caso del terremoto di Port-au-Prince ad Haiti del gennaio 2010). Sulla base di quanto detto appare evidente la necessità di intervenire sulle strutture sanitarie esistenti successivamente ad un'accurata valutazione del rischio in presenza di azioni sismiche, in considerazione del fatto che la sicurezza di dette costruzioni rimane ad oggi vincolata fondamentalmente ai soli aspetti strutturali. Nell'ultimo decennio la norma italiana (D.M. 22/12/2000; Ministero della Salute, 2005) ha recepito questa crescente sensibilità nei confronti delle strutture ospedaliere, soprattutto nei riguardi di quelle esistenti che rappresentano la risorsa principale. Difatti si è cercato di indirizzare gli interventi prevalentemente verso quei centri o poli d'emergenza, strategicamente individuati sul territorio, affinché soddisfacessero quei requisiti particolarmente stringenti dell'operatività immediata, nella consapevolezza che l'adeguamento di tutte le strutture ospedaliere sul territorio nazionale fosse

un'operazione troppo dispendiosa.

Come noto i parametri che caratterizzano il rischio sismico sono essenzialmente tre (Dowrick, 1977): la pericolosità sismica, la vulnerabilità e l'esposizione. Se la pericolosità sismica è una caratteristica intrinseca del territorio in cui sorge la struttura e non può essere modificata, lo stesso non si può dire per la vulnerabilità e l'esposizione. L'elevata complessità che caratterizza gli ospedali, li rende particolarmente vulnerabili sia dal punto di vista strutturale che da quello impiantistico e funzionale, senza dimenticare che un gran numero di strutture sanitarie sono state progettate senza adeguati criteri antisismici in quanto all'epoca della loro costruzione le conoscenze erano più limitate ovvero il territorio su cui sono state edificate era classificato con un livello di sismicità più basso o addirittura come non sismico. Anche l'esposizione risulta elevata a seguito dell'affollamento, della presenza di pazienti non autonomi e di contenuti tecnologici molto costosi e allo stesso tempo indispensabili per la piena funzionalità dell'edificio; tra l'altro, a seguito di un evento sismico, l'esposizione è ulteriormente incrementata dal flusso di feriti proprio nelle prime ore seguenti un terremoto (WHO & NSET, 2004), Figura 1.

A seguito di queste considerazioni riguardanti la strategicità delle strutture sanitarie e l'elevato rischio a cui esse sono soggette risulta evidente come non sia sufficiente garantire la sola sicurezza strutturale ma sia indispensabile la salvaguardia della piena operatività nell'emergenza post-sisma. Per rispettare tale requisito è necessario considerare anche il ruolo chiave degli elementi non strutturali e gli aspetti organizzativi della struttura. Come dimostrato dalle esperienze dei passati terremoti, gli elementi non strutturali e il contenuto tecnologico, oltre a rappresentare una parte rilevante dei costi connessi

Figura 1  
Flusso di feriti nei primi  
giorni seguenti un terremoto  
(WHO & NSET, 2004).



alla realizzazione di una struttura ospedaliera (Figura 2) influenzano notevolmente il comportamento e la funzionalità dell'edificio (Miranda & Taghavi, 2003).  
L'interferenza con il flusso di persone dovuto alla caduta di controsoffitti o tramezzature, la

presenza di incendi o fiamme a seguito della rottura dell'impianto antincendio o la perdita di sostanze pericolose connessa alla rottura di tubazioni possono mettere in serio pericolo l'incolumità delle persone presenti nell'edificio (Figura 3).

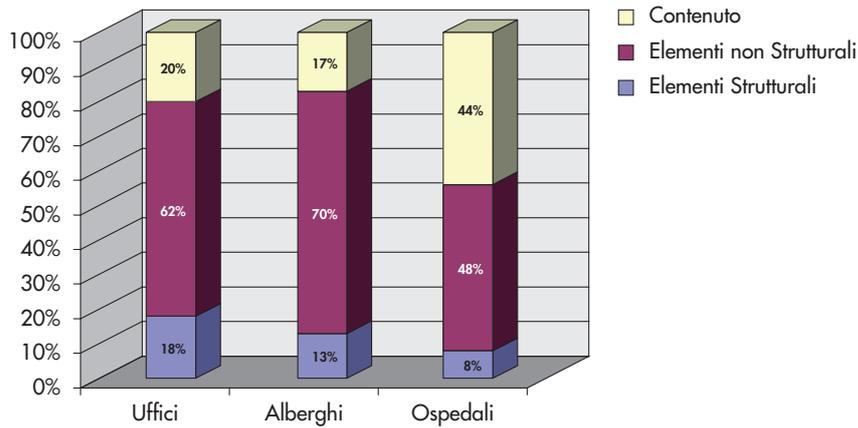
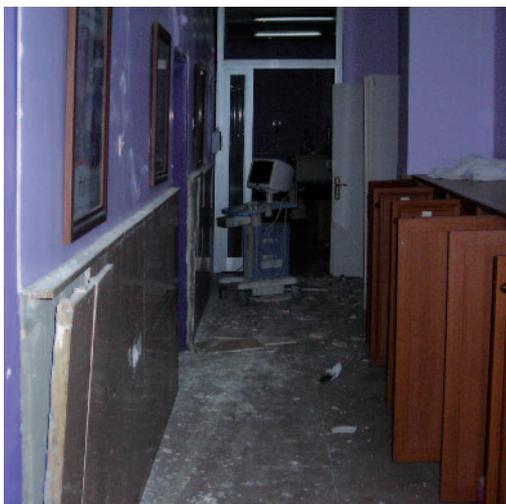


Figura 2  
Costi connessi alla realizzazione di un ospedale (Miranda & Taghavi 2003).



Figura 3  
Tipici danni non strutturali rilevati in strutture ospedaliere dopo un terremoto di magnitudine medio-alta.



L'operatività e la funzionalità di un ospedale sono quindi fortemente dipendenti dall'integrità ed efficienza dei servizi tecnologici di base, il loro danneggiamento o la loro interruzione può rendere anche gli ospedali più all'avanguardia praticamente inutilizzabili.

All'importanza degli elementi non strutturali deve essere aggiunta quella degli aspetti organizzativi come la presenza di piani di emergenza o la preparazione del personale a gestire situazioni di particolare entità; tali aspetti sono di fondamentale importanza e vanno adeguatamente valutati nello studio della funzionalità complessiva della struttura sanitaria (Cimellaro et al., 2008).

## 2. La valutazione del rischio sismico mediante metodologie semplificate

Un approfondito studio della vulnerabilità sismica delle strutture ospedaliere richiede, oltre alla formulazione di complessi modelli strutturali, l'acquisizione di un adeguato livello di conoscenza legato sia alle caratteristiche dei materiali che ai dettagli costruttivi; questo comporta la necessità di un grande onere computazionale oltre ad un elevato dispendio di tempo dovuto all'entità delle indagini da eseguire per l'acquisizione del livello di conoscenza desiderato, come indicato al punto C8.5.4 della Circolare del 2 febbraio 2009 n°617 (Circ. 02/02/2009). Inoltre tutte le strutture ospedaliere dovrebbero essere in grado di garantire adeguati standard in relazione a tutti i parametri che ne influenzano la vulnerabilità.

L'analisi di tutti gli aspetti sopra citati richiede conoscenze approfondite e spesso interdisciplinari, nonché un notevole dispendio di tempo, senza trascurare la carenza di adeguati metodi per la valutazione del comportamento, sotto azioni dinamiche, di tutti gli elementi non strutturali. Considerato l'elevato numero di strutture ospedaliere esistenti, la complessità di procedere per tutte con analisi accurate in tempi brevi e l'esigenza, d'altro canto, di una valutazione quanto più immediata possibile delle loro condizioni di sicurezza, appare necessario definire un metodo che consenta di individuare in modo speditivo quali siano le strutture che presentino il maggior grado di rischio e che quindi per prime necessitino di analisi dettagliate.

A tal fine è stata messa a punto una metodologia, basata sulla compilazione di questionari, il cui scopo è quello di fornire un indice di rischio complessivo in funzione di tutti i parametri che caratterizzano il rischio sismico: vulnerabilità, pericolosità ed esposizione. Come ampiamente discusso la vulnerabilità non è influenzata solo dagli elementi strutturali, per tale motivo nella

scheda sono riportati specifici quesiti relativi agli elementi non strutturali e alle peculiarità connesse agli aspetti organizzativi.

La scheda di rilievo proposta si basa sull' Hospital Safety Index (HSI) redatto dalla Pan American Health Organization (PAHO), facente parte della World Health Organization (WHO, 2008). Tale scheda risulta sostanzialmente diversa da analoghe schede di rilievo generalmente utilizzate nella fase di gestione delle emergenze con ricorso a verifiche speditive di agibilità degli edifici (vedi per esempio il caso della cosiddetta scheda AEDES comunemente utilizzata in Italia per le verifiche speditive di agibilità). Nel caso in esame, partendo dalla scheda utilizzata per la definizione del HSI, sono state introdotte numerose modifiche atte a migliorare l'indice di rischio focalizzando l'attenzione sulla pericolosità sismica presente nel territorio italiano e sulla differente influenza che ogni parametro ha sulla risposta complessiva della struttura. Nella realizzazione della scheda si è tenuto conto anche di un altro valido documento la cui redazione è stata condotta dalla fondazione di ricerca geoscientifica norvegese NORSAR, relativo alla valutazione della vulnerabilità sismica di ospedali e scuole sulla base di questionari (Lang et al., 2009).

## 3. Innovazioni proposte per la scheda di valutazione

L'obiettivo della metodologia messa a punto mediante schede di valutazione non è quello di sostituire le più complesse e dettagliate analisi strutturali, ma solo di fornire delle indicazioni su quali siano gli ospedali maggiormente a rischio e che quindi necessitano nell'immediato di accurate analisi basate su modelli meccanici non lineari. Inoltre, poiché all'aspetto strutturale si aggiunge la necessaria definizione del rischio sismico legata agli elementi non strutturali, agli impianti, agli aspetti organizzativi, si comprende ulteriormente la necessità di approcci di valutazione semplificati, preliminari ad analisi successive più dettagliate, ma allo stesso tempo che si basino su un approccio sistemico e non per componenti singole ed indipendenti come avviene ancora oggi in molte applicazioni.

Nella metodologia proposta sono presi in considerazione tutti gli aspetti intrinseci di una struttura ospedaliere, distinguendo differenti sezioni in funzione degli elementi esaminati, lo schema logico a cui si fa riferimento è quello riportato nelle linee guida messe a punto dalla WHO (2004) e riproposto in Figura 4.

Gli elementi fondamentali che caratterizzano la vulnerabilità (elementi strutturali, elementi non-strutturali, organizzazione) sono esaminati in tre

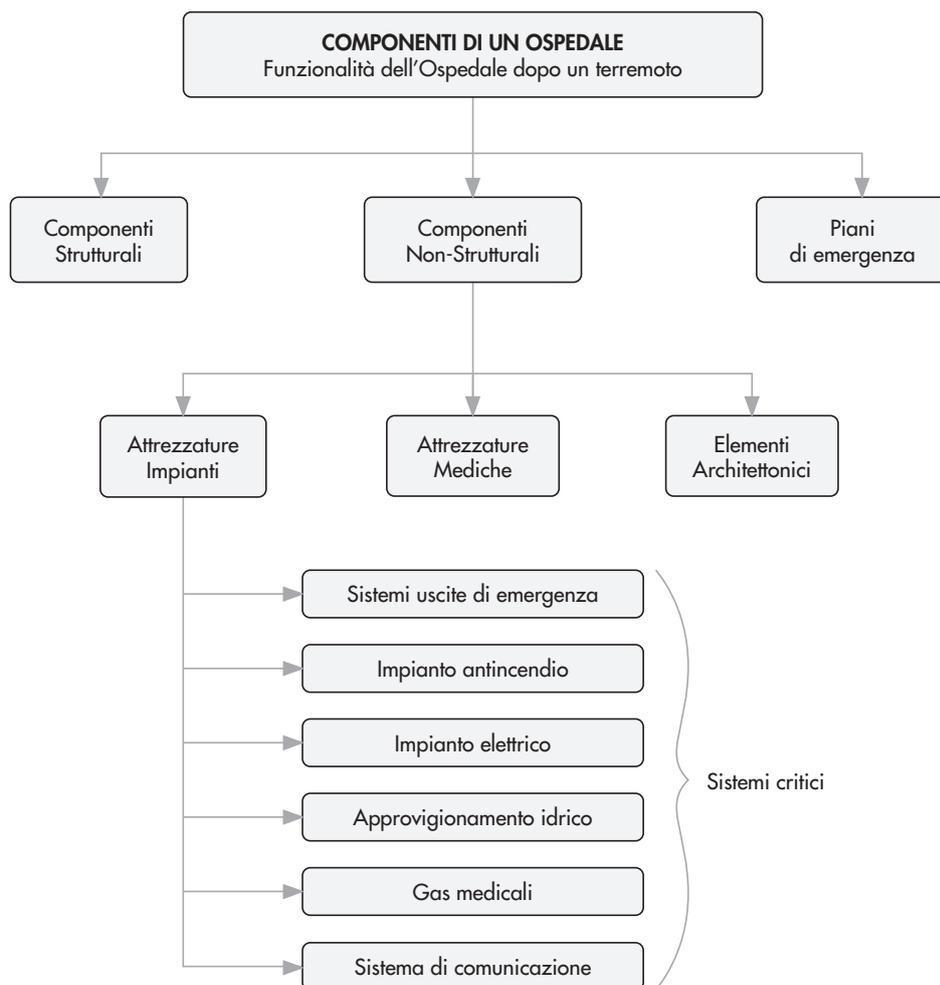


Figura 4  
Componenti delle strutture ospedaliere (FEMA396, 2003).

distinte sezioni della scheda determinando, prima separatamente e successivamente in modo combinato, degli indici di rischio. Gli aspetti legati all'esposizione e alla pericolosità sismica sono trattati in una sezione distinta insieme a informazioni di carattere generale necessarie ad un inquadramento di massima della struttura in esame.

Ad ogni quesito proposto sono associati tre livelli di rischio (basso, medio, alto) a cui corrispondono differenti punteggi nella valutazione degli indici di rischio complessivi. Tutti i quesiti e i livelli di rischio ad essi associati sono dettagliatamente descritti in specifiche linee guida realizzate per rendere quanto più agevole possibile la compilazione della scheda.

Di seguito si riporta una breve descrizione delle principali sezioni componenti la scheda e la procedura con cui sono stati determinati gli indici di rischio.

### 3.1 Informazioni generali

Le prime sezioni della scheda sono dedicate all'identificazione geografica della struttura e alla definizione di informazioni di carattere

generale come le dimensioni geometriche, l'epoca di costruzione e i materiali che costituiscono le strutture portanti. In questa parte introduttiva rientrano anche i dati relativi alla valutazione dell'esposizione e della pericolosità sismica (Figura 5).

### 3.2 Elementi strutturali

Per definire il grado di vulnerabilità degli elementi strutturali sono stati sviluppati 20 quesiti. I quesiti proposti riguardano sia informazioni relative alla concezione globale della struttura, come la regolarità in pianta ed in altezza, che informazioni specifiche connesse ai dettagli costruttivi e a configurazioni sismicamente critiche come la presenza di piani soffici o pilastri tozzi (Figura 6). Sono stati inseriti anche alcuni quesiti relativi all'identificazione di eventuali danni subiti dalle strutture a causa di passati terremoti. Al momento i quesiti sono stati sviluppati solo per le strutture con sistema resistente in c.a., ciononostante l'impostazione adottata è molto versatile e può essere agevolmente circostanziata anche per altri materiali da costruzione.

Figura 5  
Identificazione esposizione  
e pericolosità sismica.

5) DATI DI ESPOSIZIONE E DESTINAZIONE D'USO				
Destinazione d'uso attuale	1) Riferimento	2) Ordinaria	3) Ambulatoriale	
Numero di persone mediamente presenti durante la fruizione ordinaria nell'edificio		Ore di fruizione ordinaria nel giorno		Mesi di fruizione ordinaria nell'anno
Numero di posti letto	Numero di pazienti	Personale Medico e altro		
		Medici	Staff medico	Amministrazione
Bacino di utenza				

6) ZONA SISMICA DI RIFERIMENTO						
Tipologia di terreno					Cat. topografica	ZONA SISMICA
A	B	C	D	E		
Il progetto delle strutture è stato eseguito secondo norme sismiche?					SI	NO
Normativa utilizzata per la progettazione strutturale						

Figura 6  
Estratto Sezione 7:  
Elementi strutturali.

7) ELEMENTI STRUTTURALI ( STRUTTURE IN C.A.)			
QUESITO	RISCHIO		
	Basso	Medio	Alto
L'ospedale è stato esposto ad un evento significativo negli ultimi 30 anni?			
L'ospedale ha subito danni strutturali significativi? (Rispondere solo se si è risposto alla domanda precedente)			
L'ospedale è stato riparato adeguandolo agli standard sismici attuali?			
La struttura risulta regolare in pianta?			
La struttura risulta regolare in altezza?			

### 3.3 Elementi non strutturali

La sezione 8 della scheda riguarda la valutazione della vulnerabilità degli elementi non strutturali. Sono proposti un totale di 38 quesiti suddivisi in 9 sottocategorie. Come già indicato in Figura 3, sono stati presi in considerazione sia gli elementi impiantistici che architettonici, senza tralasciare opportuni quesiti legati alle particolari attrezzature mediche presenti nelle strutture sanitarie. A titolo dimostrativo di seguito è riportato un estratto della scheda relativo ai quesiti inerenti i gas medicali; per la salvaguardia di tali elementi si ritiene fondata-

tale sia il posizionamento e il tipo di ancoraggio delle bombole che la tipologia di raccordi utilizzati negli impianti centralizzati (Figura 7).

### 3.4 Organizzazione dell'emergenza

L'organizzazione dei servizi e del personale rivestono un ruolo fondamentale nella gestione delle emergenze, sia dal punto di vista dei tempi di attesa che del numero di pazienti a cui sia possibile prestare soccorso. A tal fine sono stati predisposti 28 quesiti attraverso cui si intende comprendere se sono presenti particolari procedure che consentano, a seguito di un incremento di richiesta,

Figura 7  
Estratto Sezione 8: Elementi  
non strutturali.

8) ELEMENTI NON STRUTTURALI			
QUESITO	RISCHIO		
	Basso	Medio	Alto
<u>Gas medicali</u>			
Lo stoccaggio è sufficiente per 15 giorni?			
Le bombole sono adeguatamente ancorate?			
Le bombole sono posizionate in luogo sicuro?			
Le valvole e i raccordi sono posizionati in modo sicuro?			

9) ORGANIZZAZIONE DELL'EMERGENZA			
QUESITO	RISCHIO		
	Basso	Medio	Alto
La circolazione interna all'edificio risulta adeguata in caso di sisma?			
La circolazione esterna all'edificio risulta adeguata in caso di sisma?			
Le strade di accesso sono facilmente raggiungibili?			
Sono presenti task force per rispondere alle gravi emergenze?			
L'ospedale ha istituito un centro di emergenza?			

Figura 8  
Estratto Sezione 9:  
organizzazione  
dell'emergenza.

di gestire al meglio l'emergenza e in particolare se il personale medico ed amministrativo è stato addestrato a mettere in pratica tali procedure.

### 3.5 L'indice di rischio sismico

La valutazione della sicurezza è ottenuta mediante la determinazione di opportuni indici. Sono stati sviluppati 6 indici di rischio. I primi 3 sono definiti indici di rischio primario e sono valutati singolarmente per le tre sezioni fondamentali che compongono la scheda: elementi strutturali ( $I_{STR}$ ), elementi non strutturali ( $I_{NSTR}$ ) ed organizzazione dell'emergenza ( $I_{ORG}$ ).

Gli altri tre indici combinano i risultati degli indici primari assegnando ad ognuno di essi un differente peso nel risultato finale.

Oltre ad assegnare un differente peso agli indici primari sono stati assegnati punteggi differenti anche a tutti i quesiti che compongono il questionario (indici di rischio unitario). Per comprendere al meglio la metodologia adottata si procede con un esempio.

Di seguito sono riportati due quesiti appartenenti alla sezione 7, relativa agli elementi strutturali (Figura 9). Come si può notare, l'aumento dell'indice di rischio unitario è direttamente connesso all'aumento del livello di rischio. Gli indici di rischio unitario non dipendono solo dal livello di rischio (alto, medio, basso) ma anche dall'importanza che la domanda assume sulla vulnerabilità globale. Come risulta evidente dall'esempio proposto, a parità di rischio, l'indice di rischio unitario connesso alla presenza di strutture resistenti in due direzioni ortogonali (alto se i sistemi resistenti non sono presenti in entrambe le direzioni) è quattro volte superiore a quello connesso alla possibile iterazione tra elementi strutturali e non strutturali; questo a dimostrazione della maggiore importanza del primo quesito rispetto al secondo.

Definiti gli indici di rischio unitario si può procedere alla determinazione degli indici primari, essi sono valutati mediante la seguente relazione:

$$I_{PRIMARIO} = \frac{\sum \text{Indici di rischio unitario}}{\sum \text{Indici max su } n^{\circ} \text{ di risposte}} \quad (1)$$

L'indice primario è determinato dal rapporto tra la sommatoria degli indici unitari associati alle risposte e la sommatoria degli indici di rischio primari massimi relativi alle domande a cui è stata assegnata una risposta (quindi associati al rischio alto). Sono escluse dalla sommatoria le domande a cui non è stata assegnata alcuna risposta. L'indice è ritenuto valido se si risponde ad almeno il 50% delle domande, altrimenti si associa ad esso il massimo valore. I valori che possono assumere gli indici, in base alla relazione adottata, possono variare nell'intervallo compreso tra 0 e 1. Al valore unitario corrisponde il massimo grado di rischio, mentre al valore nullo corrisponde l'assenza di rischio.

Calcolati i valori degli indici di rischio primari, anche ad essi è associato un livello di rischio, in particolare sono state definite le seguenti soglie:

$$\begin{aligned} \text{RISCHIO BASSO} & I_{PRIMARIO} < 0.33 \\ \text{RISCHIO MEDIO} & 0.33 \leq I_{PRIMARIO} \leq 0.67 \\ \text{RISCHIO ALTO} & I_{PRIMARIO} > 0.67 \end{aligned}$$

La valutazione degli indici primari è necessaria per la definizione dei successivi indici, maggiormente rappresentativi della vulnerabilità della struttura.

È stato definito l'Indice di funzionalità (FUNZ), l'indice di vulnerabilità (VULN) e infine l'indice di rischio sismico.

L'indice di funzionalità è una combinazione dell'indice primario strutturale ( $I_{STR}$ ) e dell'indice

QUESITO	RISCHIO		
	Basso	Medio	Alto
Sono presenti strutture resistenti in due direzioni ortogonali?	0	8	16
Sono possibili iterazioni tra elementi strutturali e non strutturali che alterino il comportamento della struttura?	0	2	4

Figura 9  
Indici di rischio unitario.

primario relativo agli elementi non strutturali ( $I_{NSTR}$ ). La relazione utilizzata per la sua definizione è la seguente:

$$FUNZ = \begin{cases} [1 - (0,6 I_{STR} + 0,4 I_{NSTR})] & \text{se } I_{STR} \geq 0,67 \\ 0 & \text{se } I_{STR} > 0,67 \end{cases} \quad (2)$$

Risulta evidente come la vulnerabilità degli elementi non strutturali influenzi maggiormente la funzionalità complessiva; ad essa è stata attribuita un'influenza del 40%. Si pensi, ad esempio, al collasso delle parti non strutturali (tompagni e/o tramezzi) che di fatto limita l'utilizzo di parti della struttura destinate alla degenza ovvero a funzioni critiche quali quelle operatorie. Nella valutazione dell'indice di vulnerabilità si tiene in conto anche dell'influenza dei parametri relativi all'organizzazione dell'emergenza ( $I_{ORG}$ ), in particolare a tale indice è associata un'influenza del 20% sulla vulnerabilità complessiva:

$$VULN = \begin{cases} [0,8 - (0,8 FUNZ - 0,2 I_{ORG})] & \text{se } FUNZ \neq 0 \\ 0 & \text{se } FUNZ = 0 \end{cases} \quad (3)$$

La vulnerabilità così determinata è il primo parametro che influenzerà l'indice di rischio

sismico complessivo. Per la definizione completa di tale indice sono da determinare ancora la pericolosità sismica e l'esposizione.

Per ciò che concerne l'esposizione (ESP), essa è connessa all'importanza della struttura, in particolare sono state definite tre classi di appartenenza: strutture di riferimento (ESP=3), strutture ordinarie (ESP=2), strutture ambulatoriali (ESP=1).

La pericolosità (HAZ) è definita invece in funzione della zona sismica (Tabella 1) di riferimento e della tipologia di terreno su cui è stata edificata la struttura. I valori di pericolosità adottati sono riportati in Figura 10. Si tenga conto che, adottando la zonizzazione sismica più recente di cui alle NTC08 (2008) e quindi basata su una definizione puntuale dell'accelerazione sismica del sito, si può determinare la cosiddetta pericolosità sismica di base e poi determinare la corrispondente zona di cui alla classificazione riportata in Tabella 1.

Dalla combinazione di tutti i parametri calcolati è possibile determinare l'Indice di Rischio Sismico nel modo seguente:

$$RISCHIO \text{ SISMICO} = VULN \cdot \frac{HAZ}{4} \cdot \frac{ESP}{3} \quad (4)$$

La relazione è stata definita in modo che i valori varino nell'intervallo compreso tra 0 e 1. Così

Figura 10  
Valori attribuiti all'indice di Hazard (HAZ).

		TIPOLOGIA TERRENO	
		A, B	C, D, E
ZONA SISMICA	1	HAZ = 4	HAZ = 4
	2	HAZ = 3	HAZ = 3
	3	HAZ = 2	HAZ = 2
	4	HAZ = 1	HAZ = 1

Tabella 1 - Zonazione sismica

Zonazione sismica		
Zona	1:	ag > 0.35g
Zona	2:	0.25g < ag < 0.35g
Zona	3:	0.15g < ag < 0.25g
Zona	3:	ag > 0.15g

come è stato fatto per gli altri indici anche in questo caso sono stati stabiliti dei parametri di soglia per definire se la struttura ospedaliera in esame presenti un livello di rischio alto, medio o basso.

RISCHIO BASSO	$I_{\text{RISCHIO SISMICO}} < 0.33$
RISCHIO MEDIO	$0.33 \leq I_{\text{RISCHIO SISMICO}} \leq 0.67$
RISCHIO ALTO	$I_{\text{RISCHIO SISMICO}} > 0.67$

#### 4. Applicazione a due casi studio

Nel presente lavoro la metodologia proposta è stata applicata a due casi studio. Le strutture ospedaliere prese in esame sono collocate in zone con differente pericolosità sismica. In particolare, la prima struttura (di seguito denominata STR1) è collocata in un'area caratterizzata da una bassa sismicità; la seconda (di seguito denominata STR2) è collocata in un'area a medio-alta sismicità quindi in una zona a più alta pericolosità sismica. Entrambe le strutture, la prima STR1 realizzata intorno agli anni '70 e la STR2 intorno alla fine degli anni '80, presentano la tipica configurazione delle strutture intelaiate in c.a.

L'ospedale STR1 è realizzato tra il 1969 e il 1979. Le normative utilizzate per la progettazione sono: il R.D.L. 2229 del 1039 e il D.L.1086 del 1971 (RDL, 1939; D.L. 1086/71). Entrambe le normative non prevedevano alcun criterio di progettazione antisismica per il territorio in cui la struttura è stata realizzata. Come detto in precedenza la struttura è interamente in calcestruzzo armato, con telai posti lungo una sola direzione e progettati per soli carichi gravitazionali. L'edificio è composto da 15 corpi di fabbrica, che si sviluppano fino ad un massimo di 11 piani e separati da un giunto tecnico.

L'ospedale STR1 presenta un elevato grado di esposizione sismica a seguito dell'elevato numero di posti letto (> 600) e di servizi sanitari offerti. Sono presenti numerosi reparti ospedalieri, tra cui i reparti di rianimazione, chirurgia, pronto soccorso e terapia intensiva.

Il complesso ospedaliero di cui fa parte il padiglione STR2 si articola in diversi padiglioni. Il padiglione in esame è stato edificato alla fine degli anni '80 e dal punto di vista strutturale è composto da 3 corpi (corpo A, B e C) di fabbrica giuntati (giunto tecnico), che hanno nell'insieme una forma ad L. La struttura portante è costituita da telai in calcestruzzo armato e solai in calcestruzzo alleggeriti con laterizi; le fondazioni sono realizzate con plinti su pali. Il fabbricato consta di sei piani fuori terra. Le altezze degli interpiani sono di 3.7 m per tutti i piani. Il Corpo A ha forma in pianta pressoché rettangolare con una larghezza di 17.95 m ed una lunghezza di 31.50 m, compreso il prolunga-

mento del corpo scala, che risulta fortemente decentrato. Il corpo B rappresenta la parte centrale dell'edificio ed ha forma pressoché quadrata, con lati di 31.60 m e 31.30 m. A differenza degli altri corpi, nel corpo B sono presenti numerose pareti, che contribuiscono alla resistenza complessiva nei confronti dell'azione sismica.

Il corpo C ha una configurazione geometrica in pianta molto simile al corpo A. Difatti, a parte qualche rientranza e il corpo scala abbastanza decentrato, si presenta pressoché rettangolare in pianta con lati di 13.60 m e 38.50 m.

Per quanto concerne, invece, l'organizzazione del padiglione si considera la seguente distribuzione ai vari piani:

- Piano seminterrato: centrale operativa 118;
- Piano terra: pronto soccorso, posto di polizia, anestesia e rianimazione;
- Primo piano: chirurgia d'urgenza, riabilitazione (reparto);
- Secondo piano: ortopedia, traumatologia;
- Terzo piano: medicina d'urgenza, riabilitazione (palestra e ambulatorio);
- Quarto piano: cardiologia clinica, cardiologia interventistica con terapia intensiva.

#### 4.1 Risultati ottenuti

L'implementazione della scheda in un apposito foglio di calcolo consente di ottenere immediatamente gli indici di rischio della struttura esaminata senza la necessità di ulteriori elaborazioni. I risultati sono organizzati in modo rapido ed intuitivo così da fornire un'indicazione sulla vulnerabilità dei tre aspetti fondamentali che la compongono (indici primari) oltre agli indici di rischio complessivi. Per ognuno degli indici primari di rischio oltre al valore numerico sono visualizzati degli istogrammi attraverso i quali è possibile avere un'immediata idea della percentuale di elementi caratterizzati da un elevato grado di rischio.

#### 4.2 Ospedale STR1

Il primo aspetto esaminato riguarda i valori assunti dagli indici primari. Ad eccezione dell'indice relativo all'organizzazione dell'emergenza ( $I_{\text{ORG}}$ ), che assume un livello di rischio medio, gli indici relativi agli elementi strutturali e non strutturali assumono entrambi un livello di rischio alto (Tabella 2).

L'elevato valore assunto dall' $I_{\text{STR}}$  è dovuto all'irregolarità sia in pianta che in altezza della struttura, alla presenza di telai resistenti in una sola direzione e alla totale assenza di qualsiasi tipo di dettaglio costruttivo antisismico. Dall'ultimazione dell'edificio sino ad oggi non sono avvenuti eventi sismici nella zona di interesse, di conseguenza non si possono avere informazioni

relative alla reale risposta dinamica dell'ospedale, pertanto i quesiti relativi a tali informazioni sono stati omessi nella compilazione della scheda.

La risposta ai quesiti relativi agli elementi non strutturali si è rivelata di maggiore difficoltà a causa della necessità di ispezionare nel dettaglio i singoli impianti presenti nell'edificio. Dall'ispezione è risultato evidente come la maggiore carenza sia quella relativa agli ancoraggi delle apparecchiature e delle tubazioni. Per ciò che riguarda il posizionamento degli impianti e la presenza di apparecchiature e forniture suppletive in caso di emergenza si è osservato generalmente un livello di rischio medio.

In Figura 11 sono riportati gli istogrammi relativi al calcolo degli indici primari per gli elementi strutturali e non strutturali. Come risulta evidente, in entrambi i casi, circa il 55% dei quesiti proposti assumono un livello di rischio alto, nel caso dell' $I_{NSTR}$  in nessun quesito si ha un livello di rischio basso.

Gli aspetti connessi all'organizzazione dell'emergenza risultano essere quelli con minor grado di rischio. La circolazione interna ed esterna all'ospedale risulta molto scorrevole, anche grazie ai recenti lavori di adeguamento. I piani di emergenza presenti non esaminano le problematiche connesse al rischio di natura sismica, così come le squadre di soccorso, presenti nella struttura, sono addestrate a gestire emergenze ma non di natura sismica; per tale motivo si è assunto un livello di rischio medio per i quesiti connessi a tali problematiche. Di seguito si riporta l'istogramma relativo all'indice

organizzativo in cui risulta evidente come per la maggior parte dei quesiti sia stato associato un livello di rischio medio (Figura 12).

La vulnerabilità complessiva (VULN) della struttura assume un valore pari a 1, corrispondente quindi al 100% di vulnerabilità. La giustificazione di tale valore è da ricercarsi nella decisione di assumere pari a 0 la funzionalità (FUNZ) se la struttura presenta un  $I_{STR} > 0.67$ .

Nonostante sia la vulnerabilità che l'esposizione siano massime, il rischio sismico complessivo risulta pari a 0.50. Tale valore, in base alle soglie stabilite, corrisponde ad un livello di rischio medio (Figura 13).

Questo risultato è dovuto alla bassa sismicità del territorio in cui sorge la struttura. Il valore di pericolosità sismica (hazard) infatti risulta pari a 2.

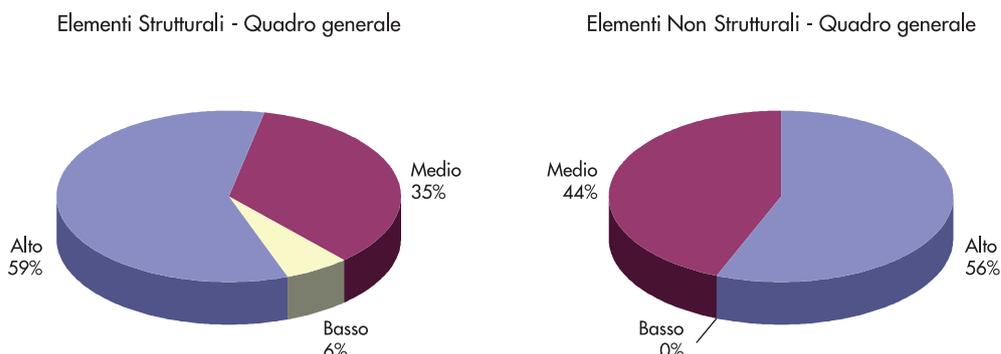
#### 4.3 Ospedale STR2

Per l'ospedale STR2 i valori assunti dagli indici primari sono tutti di valore medio (Tabella 3). Dato che la scheda è stata riempita per ogni blocco, i valori riportati sono quelli massimi. In realtà, gli indici per gli elementi non strutturali e per l'organizzazione assumono sempre lo stesso valore in quanto tra i blocchi non ci sono sostanziali differenze. Per quanto riguarda l'indice strutturale si ha un'oscillazione tra 0.47 del corpo A fino a 0.53 per il corpo B, passando per 0.50 del corpo C. Il valore più alto del corpo B si giustifica con il fatto che sono presenti delle pareti da taglio non ben distribuite. In ogni caso, tutti i corpi sono abbastanza regolari nella forma e dotati di telai in entrambe le direzioni. Anche in questo caso la risposta ai quesiti rela-

Tabella 2 - Indici primari ospedale STR1

Indice	Valore assunto	Livello di rischio
$I_{STR}$	0.78	ALTO
$I_{NSTR}$	0.74	ALTO
$I_{ORG}$	0.64	MEDIO

Figura 11  
Istogramma % risposte associate ai livelli rischio  $I_{STR}$  e  $I_{NSTR}$ .



Organizzazione dell'emergenza - Quadro generale

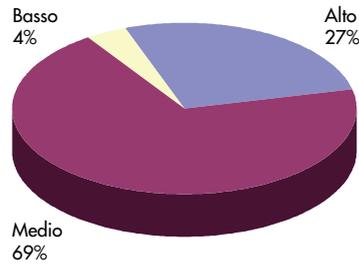


Figura 12  
Istogramma I<sub>ORG</sub>

RISCHIO SISMICO		
Funzionalità	$FUNZ = \begin{cases} 1 - (0,6 ISTR + 0,4 IINSTR) & \text{se } ISTR \geq 0,67 \\ 0 & \text{se } ISTR < 0,67 \end{cases}$	FUNZ 0%
Vulnerabilità	$VULN = \begin{cases} 0,8 - (0,8 FUNZ - 0,2 IORG) & \text{se } FUNZ \neq 0 \\ 1 & \text{se } FUNZ = 0 \end{cases}$	VULN 100%
Hazard	HAZ = funzione della zona sismica	HAZ 2
Esposizione	ESP = funzione della classificazione della struttura	ESP 3
Rischio Sismico	$RISCHIO\ SISMICO = VULN \cdot \frac{HAZ}{4} \cdot \frac{ESP}{2}$	RISCHIO SISMICO MEDIO

Figura 13  
Rischio Sismico Ospedale STR1.

Tabella 3 - Indici primari ospedale STR2

Indice	Valore assunto	Livello di rischio
I <sub>STR</sub>	0.51	MEDIO
I <sub>NSTR</sub>	0.49	MEDIO
I <sub>ORG</sub>	0.41	MEDIO

tivi agli elementi non strutturali si è rivelata abbastanza impegnativa a causa della necessità di ispezionare nel dettaglio i singoli impianti presenti nell'edificio. Dall'ispezione è risultato evidente come la maggiore carenza sia quella relativa agli ancoraggi delle apparecchiature, delle tubazioni, dei serbatoi e delle macchine refrigeranti sul tetto.

In Figura 14 sono riportati gli istogrammi relativi al calcolo degli indici primari per gli elementi strutturali e non strutturali. Come si può subito notare, in questo caso vi è un certo equilibrio nelle percentuali di rischio e quindi un indice di rischio complessivo medio.

La maggiore difficoltà è stata la compilazione della scheda relativamente agli aspetti organizzativi. L'indice di rischio organizzativo ottenuto è medio. Come si può rilevare dall'istogramma riportato in Figura 15, al 41% dei quesiti è stato associato un livello di rischio medio; d'altro

canto è emerso un livello di rischio mediamente basso per quelle questioni legate agli spazi organizzativi in caso d'emergenza, e un rischio mediamente alto per quello che riguarda direttamente l'azione antropica nella gestione di un'emergenza: informazione e formazione dei soggetti e le loro capacità organizzative in fase d'emergenza.

Determinati gli indici primari si è passati alla definizione degli indici secondari e quindi all'indice di Rischio Sismico, ottenendo il risultato riportato nella Figura 16.

La vulnerabilità complessiva (VULN) della struttura assume un valore pari a 0,48, mentre l'indice di rischio per la Funzionalità (FUNZ) si attesta al 50%. Nonostante queste percentuali siano migliori di quelle riportate per STR1, l'indice di Rischio sismico risulta comunque Medio, in quanto nel caso di STR2 la pericolosità sismica ha un peso doppio rispetto a quello di STR1.

Figura 14  
Istogramma % risposte  
associate ai livelli rischio  
ISTR e INSTR.

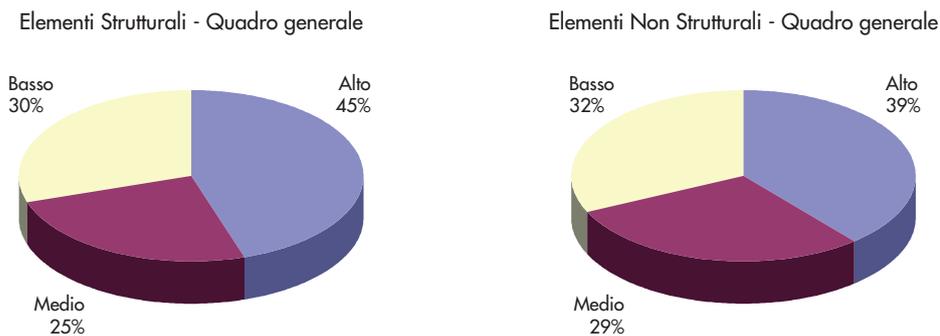


Figura 15  
Istogramma IORG.

Organizzazione dell'emergenza - Quadro generale

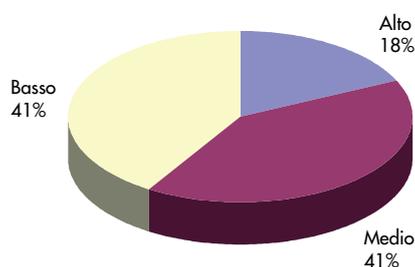


Figura 16  
Rischio Sismico Ospedale  
STR2.

RISCHIO SISMICO		
Funzionalità	$FUNZ = \begin{cases} 1 - [0,6 ISTR + 0,4 INSTR] & \text{se } ISTR \leq 0,67 \\ 0 & \text{se } ISTR > 0,67 \end{cases}$	FUNZ 50%
Vulnerabilità	$VULN = \begin{cases} [0,8 - (0,8 FUNZ - 0,2 IORG)] & \text{se } FUNZ \neq 0 \\ 1 & \text{se } FUNZ = 0 \end{cases}$	VULN 48%
Hazard	HAZ = funzione della zona sismica	HAZ 4
Esposizione	ESP = funzione della classificazione della struttura	ESP 3
Rischio Sismico	$RISCHIO SISMICO = VULN \cdot \frac{HAZ}{4} \cdot \frac{ESP}{3}$	RISCHIO SISMO MEDIO

### 5. Conclusioni

Durante gli eventi sismici che sempre più frequentemente colpiscono il territorio italiano, si rileva purtroppo una problematica relativa alla perdita di funzionalità degli ospedali molto spesso non dovuta a danni strutturali significativi, ma al danneggiamento di elementi non strutturali (in particolare impianti, partizioni, controsoffitti, arredamento e attrezzature medicali) oltre che alla carenza di una organizzazione specifica per la gestione dell'emergenza in caso di sisma. Pertanto è utile sviluppare metodologie semplificate per la mappatura del Rischio Sismico su scala territoriale in modo da individuare le priorità, cioè i casi con le carenze

maggiori, su cui intervenire. Questo approccio consente la mitigazione del rischio anche su una finestra temporale di medio-lungo termine ed in particolare può consentire una razionale ed ottimizzazione della programmazione economica per l'adeguamento sismico degli ospedali e delle strutture sanitarie esistenti.

La scheda messa a punto è stata sviluppata partendo dal cosiddetto "Hospital Safety Index" inizialmente proposto dalla Pan American Health Organization. La scheda formulata propone una nuova determinazione degli indici di rischio ed include nella valutazione del rischio sismico la pericolosità e l'esposizione oltre alla vulnerabilità strutturale e all'organizzazione dell'emergenza.

Per verificare l'applicabilità dell'approccio semplificato di valutazione proposto, sono stati considerati due casi studio comprendenti strutture ospedaliere tipiche localizzate, rispettivamente in una zona a bassa sismicità (STR1) ed elevata sismicità (STR2). I casi studio analizzati evidenziano come il peso di ciascun aspetto, tenuto in conto nella scheda proposta, contribuisca al risultato finale. Infatti, i due complessi ospedalieri risultano sostanzialmente paragonabili in termini di Rischio Sismico mentre l'esame del solo aspetto strutturale avrebbe fornito una vulnerabilità molto più elevata per il primo caso. Pertanto, l'introduzione della Pericolosità nella

valutazione complessiva, assume un ruolo rilevante al fine di inquadrare le carenze strutturali. Per quanto riguarda invece gli aspetti organizzativi pur trattandosi di complessi ospedalieri costruiti in epoche diverse ed in luoghi diversi hanno presentato una situazione analoga facendo intravedere una possibilità maggiore di uniformità delle carenze organizzative sul territorio nazionale.

L'applicazione della scheda proposta ad altri casi studio e la verifica degli indici di rischio che ne derivano mediante analisi più accurate, consentiranno di valutarne più adeguatamente l'efficacia.

### Bibliografia

- FEMA 396 (2003) - Incremental Seismic Rehabilitation of Hospital Buildings; Federal Emergency Management Agency, 2003.
- CEN (2004) - Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance; European committee for standardization, 2004.
- D.M. 14 gennaio 2008 (2008) - Nuove norme tecniche per le costruzioni.
- ASCE 7-10 (2010) - Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, 2010.
- Bruneau M., Reinhorn A. (2007) - Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 1, pages 41-62.
- Cimellaro G.P., Reinhorn A.M., Bruneau M. (2010) - Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*. Vol. 6, Nos. 1-2, 127-144.
- D.M. 22-12 (2000) - Ministero della Salute "Raccomandazioni per il miglioramento della sicurezza sismica e della funzionalità degli ospedali", 2000.
- Ministero della Salute (2005) - Miglioramento della funzionalità del sistema ospedale in caso di emergenza sismica, Volume 1 e 2, 2005.
- Dowrick D.J. (1977) - Earthquake resistant design: A manual for engineers and architects. John Wiley & Sons, London and New York.
- WHO (World Health Organization)(2004) - NSET - National society for earthquake technology - Nepal, Guidelines for seismic vulnerability assessment of Hospitals, 2004.
- Miranda E., Taghavi S. (2003) - Estimation do seismic demands on acceleration-sensitive nonstructural components in critical facilities, Proceeding of the seminar on seismic design, performance, and retrofit of non-structural component in critical facilities, ATC 29-2, Newport Beach, CA, 347-360.
- Cimellaro G.P., Fumo C., Reinhorn A., Bruneau M. (2008) - Seismic resilience of health care facilities, Proceeding of 14<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering.
- Circolare 2 Febbraio 2009 (2009) - N. 617, Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le costruzioni", di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- WHO (World Health Organization)(2008) - PAHO (Pan American Health Organization), Hospital Safety Index, Guide for evaluators, 2008.
- Lang D.H., Verbicaro M.I., Wong Diaz D., Gutierrez M. (2009) - Structural and non-structural seismic vulnerability of schools and hospitals in Central America, Final Report, NORSAR, Kjeller, Norway.
- RDL. 2229 Regio Decreto Legge n. 2229 del 16/11/1939 (1939) - Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato. G.U. del 18/04/1939, n. 92.
- D.L. n. 1086 del 5/11/1971 (1971) - Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica. G.U. del 21/12/1971, n. 321.