

DISPONIBILITÀ POST-TERREMOTO DEL SISTEMA DI OSPEDALI DELL'ABRUZZO E STRATEGIE DI ADEGUAMENTO

Camillo Nuti¹, Ivo Vanzi¹

1. Dipart. di Prog., Riab. e Contr. delle Strutt. Arch., PRICOS, University G. D'Annunzio of Chieti, Viale Pindaro 42, 65127, Pescara, Italy, c.nuti@pricos.unich.it, i.vanzi@pricos.unich.it

INTRODUZIONE

Gli ospedali svolgono un ruolo centrale nel minimizzare i disagi alla popolazione in caso di eventi sismici; nondimeno la loro sicurezza sismica è generalmente bassa. Gli ospedali sono, infatti, sistemi complessi, e contengono un gran numero di impianti fragili all'azione sismica, spesso più fragili delle strutture che li contengono.

L'adeguamento sismico degli ospedali esistenti è un problema cruciale. I tipi strutturali sono estremamente vari in molti paesi, con edifici in muratura e cemento armato, progettati secondo le norme del periodo di costruzione; questi, come le presenti d'altra parte, con la possibile eccezione del recente codice Californiano per ospedali nuovi, sono inadeguate per questo tipo di strutture.

A livello regionale, si può osservare, che la messa fuori uso di un solo ospedale influenza i servizi richiesti ai rimanenti, perché i pazienti sono trasportati agli ospedali vicini. L'analisi del problema degli ospedali esistenti, considerati come un sistema regionale, può completare utilmente le informazioni sul loro adeguamento.

Si possono assumere diversi indici per misurare la risposta come sistema regionale, come ad esempio i danni diretti sugli ospedali e il peggioramento della qualità di servizio offerto dal sistema; in questo lavoro, l'attenzione si è concentrata su entrambi gli aspetti.

Come indice di comportamento del sistema, la distanza coperta da ogni ferito per essere ricoverato è sembrato un parametro particolarmente informativo. La distanza per ferito è calcolata, assegnato un evento sismico, valutando lo stato di ogni ospedale in termini di numero di letti disponibili ed il numero di feriti in ogni comune. I feriti viaggiano quindi da ogni municipio all'ospedale più vicino finché questo esaurisce la sua capacità. Viene quindi valutata la distanza media coperta da ciascun ferito.

La procedura permette di individuare gli ospedali più critici, ovvero quelli il cui funzionando ha la maggior influenza sul comportamento di sistema. Viene quindi valutata l'efficacia delle varie strategie di intervento ed è così possibile identificare la più conveniente.

Un importante punto esaminato in questo studio è quanto influente sia, sui risultati finali, una valutazione precisa delle singole fragilità degli ospedali. Sarà mostrato, come è intuitivo, che questo aspetto è spesso cruciale nella scelta dell'adeguamento più conveniente.

Alcune delle ipotesi che saranno fatte in questo lavoro, come la relazione tra l'intensità del terremoto ed il numero dei feriti, possono essere raffinate; la procedura presentata è comunque generale e può tener conto di modelli più dettagliati di questi aspetti.

Questo lavoro fa parte di una ricerca più generale sugli ospedali esistenti in zona sismica; gli sviluppi delle ricerche hanno riguardato analisi di vulnerabilità particolareggiate di ospedali singoli, dove questo è analizzato come un sistema composto di sottosistemi in serie

o in parallelo e lo stato limite è il funzionamento delle camere operatorie [6, 9 12]; studi a scenario di danni in terremoti passati [3, 4 5]; ed infine studi sul comportamento di sistemi di ospedali regionali [10, 11].

INDICI DI FUNZIONAMENTO PER IL SISTEMA DI OSPEDALI REGIONALE

La mortalità dei feriti in caso di evento sismico si riduce sostanzialmente se ricevono cure in breve tempo. Questo dipende sia dalla distanza per arrivare agli ospedali che dalla velocità media di trasporto. Dopo un terremoto forte entrambe queste quantità tendono purtroppo, verso valori peggiorativi del funzionamento del sistema. La distanza tende infatti ad aumentare mentre la velocità di trasporto tende a diminuire, a causa di:

- Danni e/o eccessiva affluenza agli ospedali
- Danni e/o eccessivo utilizzo della rete di trasporto

Il primo fattore causa un forte aumento della distanza da percorrere perché i feriti in eccesso rispetto alla capacità degli ospedali devono essere trasportati altrove; il secondo fattore causa invece la diminuzione della velocità di trasporto e l'aumento della distanza da percorrere per arrivare ad un ospedale per esempio a causa di collegamenti di trasporto fuori servizio.

In questa versione del lavoro, per semplicità è modellato il solo danno agli ospedali, sebbene l'importanza del danneggiamento della rete di trasporto sia certa. Questo aspetto potrà essere considerato in uno sviluppo successivo del modello.

L'attenzione è stata concentrata sulla ricerca di un parametro in grado di definire sinteticamente lo stato globale del funzionamento della rete, purché fosse sufficientemente descrittivo; la distanza in linea d'aria percorsa da ogni ferito, da definirsi in senso probabilistico, è sembrato adatto a questi scopi. Questo parametro, infatti, sotto l'ipotesi di distribuzione di uniforme della rete di trasporto, accettabile in una regione sviluppata e a grande scala, è proporzionale al tempo necessario perché un ferito sia ricoverato. La sua riduzione diminuisce la mortalità. In condizioni normali, la funzione di distribuzione cumulata (CDF) della distanza tra un abitante della regione e l'ospedale più vicino, calcolata in base ai dati Istat, è mostrata in figura 1.

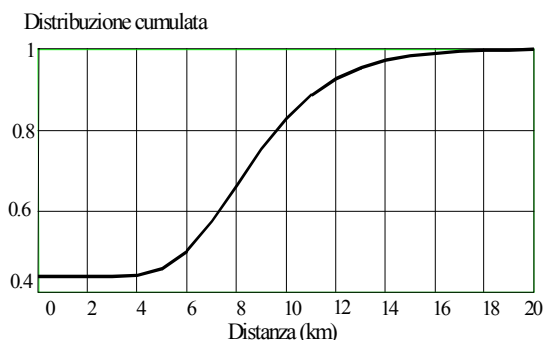


Figura 1. Distribuzione cumulata della distanza per raggiungere un ospedale in Abruzzo

Circa il 45% degli abitanti dell'Abruzzo vive in comuni con almeno un ospedale (distanza uguale a zero) ed il 96% della popolazione trova un ospedale a meno di 15 km. La CDF ed il valor medio saranno confrontati con quelli calcolati in caso di evento sismico, e con le

diverse opzioni di adeguamento. Il confronto permetterà di valutare la perdita di efficienza a causa del terremoto ed il confronto tra diverse scelte di adeguamento.

Un problema importante è come istruire i direttori sanitari sui feriti che eccedono la capacità di ospedale. Per risparmiare tempo prezioso è desiderabile che abbiano informazioni su dove conviene inviarli in caso di sisma, senza doversi mettere in contatto con gli altri istituti. A questo fine si è deciso di calcolare le statistiche di un secondo parametro, il coefficiente di occupazione degli ospedali, ovvero il rapporto tra i pazienti ed il numero nominale di posti letto. In Italia, questo valore normalmente vale circa il 70%; 100% indica che tutti i letti sono utilizzati.

Un terzo importante parametro è il danno ad ogni ospedale, in termini di numero di posti letto persi. Questo è assunto proporzionale ai danni diretti per il sisma; si noti che questo parametro è indipendente dal comportamento a sistema degli ospedali.

IL MODELLO A SISTEMA DEGLI OSPEDALI SOTTO EVENTO SISMICO

Il sistema regionale: popolazione e distribuzione degli ospedali sul territorio

L'Abruzzo ha una popolazione di circa 1'300'000 abitanti, con bassa densità; le città più importanti, L'Aquila e Pescara contano approssimativamente 100'000 abitanti; la popolazione rimanente è distribuita uniformemente sul territorio (cfr. figura 2; i diametri delle circonferenze sono proporzionali agli abitanti di ogni comune e la circonferenza massima rappresenta 120'000 abitanti).

L'ubicazione degli ospedali segue piuttosto da vicino la distribuzione della popolazione (cfr. figura 3, la circonferenza massima rappresenta 1'369 posti letto). I venticinque ospedali della regione e le loro capacità sono elencati nella tabella 1.

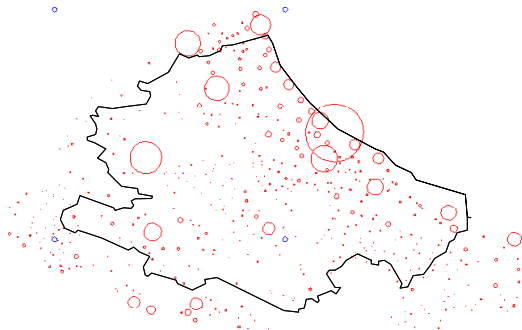


figura 2. Distribuzione della popolazione in Abruzzo

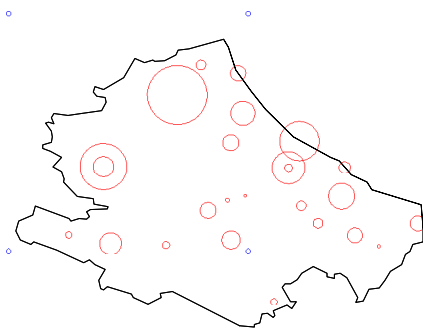


figura 3. Distribuzione degli ospedali in Abruzzo

Tabella 1: ospedali in Abruzzo

Numer o	Capacità (n. letti)	Comune	Nome dell'ospedale
1	552	Atri	S.Liberatore
2	501	Avezzano	Ss Filippo
3	165	Pescina	Rinaldi
4	150	Tagliacozzo	Umberto io
5	150	Castel Di Sangro	Civile
6	750	Chieti	Ss Annunziata
7	178	Chieti (scalo di Chieti)	Il L. del di di De Camillo di San
8	220	Guardiagrele	Maria Ss Immacolata
9	350	Giulianova	Maria Ss.Ma D.S.
10	1073	L'Aquila	Salvatore di San
11	470	L'Aquila	S. Maria C.
12	597	Lanciano	Lanciano
13	345	Atessa	Atessa
14	224	Casoli	Casoli
15	221	Sant'omero	Val Vibrata
16	262	Ortona	Berna
17	370	Penne	S.Massimo
18	901	Pescara	Civile Dello Spirito
19	365	Popoli	Ss.Trinita
20	95	Tocco Da Casauria	Domenico Filomusi
21	64	Valentino di San io	Presidio
22	420	Sulmona	Dell'Annunziata
23	1369	Teramo	Riuniti
24	347	Vasto	Presidio

Modellazione del numero dei feriti dal sisma

La relazione tra intensità del terremoto e numero medio di feriti in percentuale della popolazione, $\bar{C}(I)$, può essere ricavata in base ai tipi di edificio. La fragilità degli edifici ed il loro coefficiente di occupazione sono fortemente correlati al numero dei feriti dopo il terremoto. Per un approfondimento sull'argomento si può fare riferimento a Coburn e Spence. Nel lavoro presente, i dati sugli edifici e sul loro coefficiente di occupazione sono dedotti da Colozza et al., mentre i dati sulla popolazione sono tratti dall'Istat. E' stata utilizzata la seguente relazione diagrammata in figura 4:

$$\bar{C}(I) = (I - I_{\min})^4 \cdot 0.00048 \quad (1)$$

dove $I_{\min}=7$ MM.

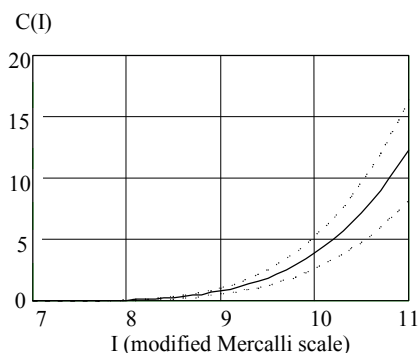


figura 4. Feriti in percentuale della popolazione

Per accertare l'influenza della legge adottata tra intensità del sisma e numero dei feriti sui risultati, è stata condotta un'analisi di sensibilità preliminare sulla (1), aumentata e diminuita del 33% (linee tratteggiate in figura 4). Le variazioni nei risultati sono stati inferiori al 5% ragione per cui la (1) è stata mantenuta fissa nelle analisi.

Modello della fragilità degli ospedali

La tipologia e l'anno di costruzione degli edifici ospedalieri sono estremamente variabili; in [Nutti et al., 1998a] è stata presentata una semplice, ed abbastanza accurata, procedura per stimare il rischio sismico degli ospedali italiani. In questo studio sono usati i dati così ricavati. Per ogni ospedale considerato, le fragilità calcolate relativamente allo stato di limite di occupazione immediata hanno permesso il calcolo di un indicatore di danno come segue:

- l'indice di danno (DI) varia tra 0 (nessun danno) e 1 (il crollo) ed esprime il rapporto tra il numero di letti disponibili prima e dopo il terremoto
- il DI è lineare rispetto all'intensità del terremoto
- $DI=0$ per la probabilità di collasso P_f (letta dalla curva di fragilità) minore di 0.2 e $DI=1$ per $P_f > 0.6$

Dalle ipotesi fatte, la curva dell'indice di danno è definita da due valori IMM_0 ed IMM_1 , come mostrato in fig. 5a.

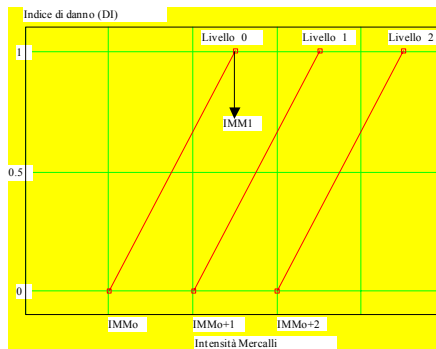


Figura 5a: indice di danno in funzione dell'intensità di terremoto

I valori di IMM_0 ed IMM_1 per gli ospedali di Abruzzo sono mostrati in tabella 2.

Tabella 2. Valori dei parametri per l'indice di danno DI negli ospedali abruzzesi

N.	IMM_0	IMM_1	N.	IMM_0	IMM_1	N.	IMM_0	IMM_1
1	6.2	7.5	10	5.3	6.5	19	6.2	7.5
2	6.2	7.5	11	6	7.5	20	6	7.5
3	6.2	7.5	12	6	7.5	21	6	7.5
4	6	7.2	13	6	7.5	22	5.3	6.5
5	5.3	6.4	14	5.2	6.4	23	6.2	7.5
6	6	7.5	15	5.2	6.4	24	6	7.5
7	6	7.5	16	6	7.5	25	6	7.5
8	5.2	6.2	17	5.2	6.4			
9	5.2	6.5	18	6.2	7.5			

Nelle analisi, i danni agli ospedali ed il rapporto tra feriti e popolazione sono modellati come variabili aleatorie (v.a.) lognormali, con coefficiente di variazione (c.o.v.) pari a 0.15, ed il valor medio funzione dell'intensità del terremoto secondo quanto visto sopra. In seguito ad adeguamento sismico si fa l'ipotesi che il DI di ogni ospedale si muova parallelamente a sé stesso di un grado IMM alla volta, spostandosi così dal livello 0, quello iniziale, al livello 3 (cfr. fig. 4)

In lavori precedenti (cfr. Nuti e Vanzi, EESD) gli autori hanno considerato un'unica funzione di fragilità ricavata da 3, come approssimazione ragionevole della vera curva di fragilità funzionale. Sono state considerate un totale di cinque curve di danno, da livello 0 a 4 in figura 5b, ognuno corrispondente ad un diverso livello di adeguamento; i primi tre erano stati dedotti da (Monti Nuti l'ospedale di??). Le curve 3 e 4 erano stati ulteriormente

considerate, ottenute dalle precedenti con una traslazione di mezzo grado MM e corrispondenti a livelli di retrofitting più alti.

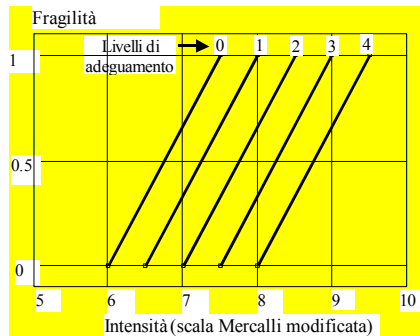


figura 5b. Curve di danno considerate

Alcuni dei risultati mostrati in questo lavoro sono disponibili per entrambe le ipotesi fatte sulle curve di fragilità. Poiché la maggior parte di questi sono relativi all'ipotesi di curva di fragilità unica per tutti gli ospedali, tabelle e diagrammi, in quanto segue, a meno che non diversamente specificato, si riferiscono a questa ipotesi. Quando saranno mostrati risultati per la prima, più realistica ipotesi di fragilità diverse per ciascun ospedale, queste saranno indicate con l'asterisco (*) e saranno confrontate con i risultati della seconda ipotesi per accertarne l'influenza.

Modello dell'azione sismica

Il classico modello di Cornell, con sismicità diffusa, è stato utilizzato per modellare l'azione sismica. Dopo un controllo preliminare volto ad identificare le aree sismogenetiche più influenti sul sistema, sono state selezionate le tre aree mostrate in figura 6. In ogni area sismogenetica, le coordinate dell'epicentro sono variabili aleatorie indipendenti, con distribuzione continua tra il minimo e massimo valore delle coordinate dei punti dell'area.

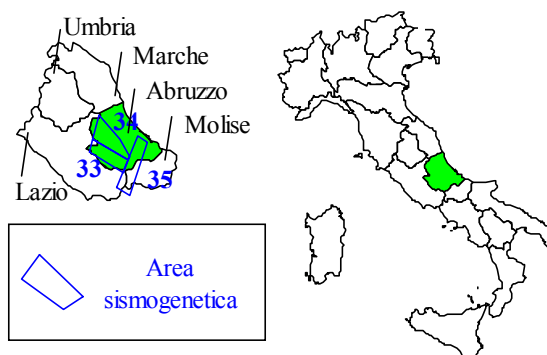


figura 6. Aree sismogenetiche

La successione temporale dei terremoti è modellata con la legge di Poisson mentre la distribuzione delle intensità dato un evento è modellata con la legge di Gutenberg- Richter doppiamente troncata:

$$\lambda(i) = \lambda(i_{MIN}) \cdot [1 - F_I(i)] \cdot F_I(i) = 1 - \frac{\exp(-\beta \cdot i) - \exp(-\beta \cdot i_{MAX})}{\exp(-\beta \cdot i_{MIN}) - \exp(-\beta \cdot i_{MAX})} \quad (2)$$

in cui β è il parametro di severità ed i_{min} e i_{max} sono l'intensità minima e massima. I parametri della legge di Gutenberg - Richter sono valutati sulla base della sismicità storica e sono mostrati in tabella II (la scala di intensità è la Mercalli modificata).

Tabella II: parametri delle aree sismogenetiche

regione	i_{min}	i_{max}	λ	β
33	6.0	11	0.464	0.373
34	6.0	10	0.337	0.701
35	6.0	10	0.122	1.527

L'intensità considerata $i_{min} = 6$ MM è il valore minimo perché si verificano danni ad ospedali ed edifici.

E' stata adottata una legge di attenuazione circolare:

$$\Delta I_s(R) = a + b \cdot (R + R_o) + c \cdot \log(R + R_o) + \varepsilon \quad (3)$$

i cui parametri sono stati tarati sulla base di registrazioni di eventi in Italia centrale:

$$R_o = 3 \text{ Km}; a = -0.5; b=4.43; c=0.056, \varepsilon = N(0; \sigma_\varepsilon = 1.037).$$

Procedura di simulazione

Le proprietà statistiche degli indici di funzionamento: distanza per ferito, coefficiente di occupazione e numero di perdite di posti letto sono state calcolate con una procedura di simulazione numerica (schema Montecarlo) basato sui passi seguenti:

1. al tempo $t=0$, estrazione delle coordinate epicentrali e dell'intensità del terremoto
2. calcolo dell'attenuazione dell'intensità sismica nei comuni e negli ospedali
3. al tempo $t=0$, cioè immediatamente dopo che il terremoto ha colpito:
 - 3.1 estrazione della v.a. numero dei feriti nei comuni e danno negli ospedali
 - 3.1.1 nei comuni: estrazione del numero di feriti
 - 3.1.2 negli ospedali: estrazione del danno. Controllo di se la nuova capacità dell'ospedale (NLU posti letto) è sufficiente per gli NFP pazienti già presenti nella struttura.
Se $NFP > NLU$, l'ospedale diventa un punto di partenza per i feriti
 - 3.2 trasporto dei feriti dai comuni e dagli ospedali pieni
 - 3.2.1 nei comuni: trasporto dei feriti all'ospedale più vicino, in assenza di informazioni
 - 3.2.2 negli ospedali: trasporto dei feriti al più vicino ospedale non pieno
4. al tempo $t > 0$, nell'ospedale h dove arrivano i feriti, controllo della sua capacità. Se l'ospedale non ha posto per nuovi pazienti, si trasportano i feriti che eccedono la capacità dell'ospedale al più vicino ospedali non pieno
5. ripetizione del ciclo finché tutti i feriti sono stati presi cura da un ospedale

6. ripetizione della simulazione fino a che le statistiche sugli indici si sono stabilizzate.

La simulazione condotta per la regione Abruzzo ha preso in considerazione tutti gli ospedali all'interno della regione (25 ospedali, elencati in tabella 1) ed anche alcuni ospedali nelle regioni limitrofe delle Marche, Lazio e Molise: infatti, in caso di forti eventi sismici vengono utilizzati anche gli ospedali in quelle regioni.

Anche i comuni al di fuori della regione Abruzzo e a distanza minore di 20 km (corrispondente ad un'attenuazione di 2 gradi Mercalli secondo la parte deterministica della (3)) sono stati presi in considerazione poiché si è riscontrata un'interazione importante.

Un esempio che può chiarificare ulteriormente la procedura dei passi seguiti è mostrato in Appendice A.

La procedura è stata codificata in un programma di calcolo. Il tempo richiesto per le simulazioni è stato accettabile giacché la scelta di fermarsi allorché il c.o.v. degli stimatori (indicati con il simbolo $\hat{\cdot}$) dei valori medi degli indici di funzionamento:

$$\hat{\delta}_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\mu}}; \quad \hat{\mu} = m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; \quad \hat{\sigma} = s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - N \cdot m^2 \right)}$$

fosse minore del 10% ha richiesto circa 1000 simulazioni per ogni area sismogenetica, con tempo di calcolo di venti minuti su un pentium III 700; il programma è stato scritto in fortran ed è stato compilato con Compaq Visual Fortran 6.5.

RISULTATI

Introduzione

L'adeguamento sismico di un sistema di ospedali fornisce due ordini di benefici: (1) migliore servizio per gli utenti degli ospedali e (2) minor costo di riparazione per i proprietari delle infrastrutture.

Gli indici di funzionamento scelti sono la distanza percorsa per ferito ed il coefficiente di occupazione, per quantificare (1), ed il numero di perdite di posti letto, per quantificare (2), o altrimenti semplici elaborazioni algebriche di questi. Si noti che la distanza per ferito è un indice di funzionamento più informativo rispetto al danneggiamento dei posti letto; quest'ultimo, infatti, non tiene conto del comportamento degli ospedali come un sistema a rete ma quantifica solo il rischio sismico in ogni ospedale. Il criterio di scelta dovrebbe quindi dare maggior peso ad indici di funzionamento di sistema rispetto ad indici diversi.

Le analisi (1) quantificano l'effetto dell'adeguamento sismico degli ospedali sulla riduzione della distanza media per ferito; una diminuzione di quest'ultima implica una diminuzione della mortalità.

I costi (adeguamento sismico degli ospedali) ed i benefici (diminuzione della distanza oer ferito) non sono state confrontate su base omogenea (monetaria) perché il risultato sarebbe, nell'opinione degli autori, estremamente discutibile: sarebbe, infatti, necessario usare in primo luogo correlazioni tra distanza percorsa per giungere ad un ospedale e tempo ed in secondo luogo tra tempo e valore monetario di mortalità più bassa. Mentre in principio questo sarebbe fattibile, usando dati di buona qualità, i risultati sarebbero estramente dipendenti dai dati stessi. Le analisi (1) sono condizionate ad un

evento sismico in una delle aree sismogenetiche e mirano a rispondere alle domande seguenti:

- quale è l'ordine con cui adeguare gli ospedali in un sistema
- quale livello di adeguamento sismico sia più conveniente
- quale sia l'effetto di alcune comuni misure di emergenza (installazione di ospedali da campo, aumento della capacità degli ospedali attraverso misure di emergenza come ad esempio disporre posti letto nei corridoi)
- quale ubicazione scegliere per costruire un nuovo ospedale
- quali ospedali abbiano capacità di cura in caso di evento forte sismico

e sono tarate, in modo particolare, per stimare l'efficacia relativa di decisioni di intervento. Le analisi (2) mettono a confronto i numeri di posti letto in ospedali adeguati con quelli facenti parte di ospedali danneggiati dal sisma; poichè, in questo caso, i costi ed i benefici sono omogenei, è stata condotta un'analisi tradizionale costi-benefici. Queste sono condizionate ad un periodo di osservazione di 1 anno e mirano a rispondere alle domande seguenti:

- qual è il guadagno, in termini di riduzione in posti letto persi, degli interventi di adeguamento
- dopo quanti anni dall'intervento di adeguamento questo si ripaga.

Nel seguito il suffisso b (e.g. 1.b) indica risultati normalizzati al costo di adeguamento sostenuto (per il numero di caso in esame numeri di posti letto in ospedali adeguati) , mentre il suffisso a indica risultati non normalizzati.

Le analisi (1) comprendono cinque sub-analisi (1.a a 1.e):

(1.a) Identificazione degli ospedali adeguati cui corrisponde il massimo beneficio

Le analisi sono state eseguite considerando la fragilità di un singolo ospedale a livello 1 o 2, mentre le fragilità dei rimanenti sono a livello 0 (figure 5a e 5b).

L'adeguamento di un solo ospedale, a livello 1 o 2, comporta, infatti, il calo nel valore della distanza che ogni ferito deve percorrere; il massimo miglioramento ottenibile è quello associato con un sistema di ospedali non fragili. Si è scelto di esprimere i miglioramenti associati con l'adeguamento di un solo ospedale normalizzando al massimo possibile miglioramento cioè:

$$i1a(H,F) = \frac{r(0) - r(H,F)}{r(0) - r(\infty)} \quad (1)$$

in cui $r(H,F)$ è il valor medio della distanza per ferito dopo l'adeguamento dell'ospedale H a livello F (1 o 2), $r(0)$ e $r(\infty)$ indicano rispettivamente la stessa quantità con gli ospedali nello stato corrente e nello stato tale da essere non fragili, livello ∞ .

Poichè i risultati sono calcolati per simulazione numerica, è stato anche possibile calcolare il CDF della distanza per ferito. Questo è stato fatto per i livelli 0 ed ∞ dopo l'intervento di adeguamento sugli ospedali selezionati; le curve sono state confrontate col CDF in condizioni normali in Abruzzo.

(1.b) come (1.a), per unità di spesa di adeguamento

L'adeguamento di un ospedale è normalmente condotto intervenendo su tutti i suoi impianti allo stesso momento e quindi l'analisi (1.a) è ragionevole. Comunque i risultati sono influenzati verso miglioramenti più grandi per ospedali più grandi mentre è anche interessante confrontare i miglioramenti per unità di costo di adeguamento. Nell'ipotesi che il costo di adeguamento sia direttamente proporzionale al numero di letti in un ospedale, il miglioramento per unità di costo di adeguamento in può essere calcolata semplicemente dividendo i risultati ricavati in (1.a) per il numero di letti:

$$i1b(H, F) = \frac{r(0) - r(H, F)}{r(0) - r(\infty)} \cdot \frac{1}{nb(H)} \quad (1)$$

in cui $nb(H)$ è il numero di letti nell'ospedale H

(1.c) l'Identificazione del livello più conveniente di intervento di adeguamento

La scelta del livello di adeguamento (livelli 1 - 4) dovrebbe essere fatta sulla base di un'analisi costi - benefici. Benefici associati con l'adeguamento fino al livello 4 sono stati calcolati per sei ospedali, i tre più importanti dalle analisi (1.a) e (1.b). Questo ha permesso identificazione del livello più conveniente di intervento di adeguamento. Il costo ai vari livelli di intervento non è considerato in questo lavoro.

(1.d) Determinazione dell'efficacia di comuni strategie di emergenza

Due comuni misure di emergenza dopo un terremoto forte consistono nell'aumentare la capacità nominale di ospedali, ovvero aggiungere posti letto in posti dove normalmente questo non è consentito (ad esempio corridoi) od installare un ospedale da campo nell'area epicentrale così da essere quanto più vicini possibile ai feriti.

L'efficacia di tali strategie è stata stimata confrontando il valor medio della distanza per ferito nella rete di ospedali nello stato attuale (senza adeguamento) con quelli calcolati dopo avere aumentato la capacità nominale degli ospedali di un fattore di 2 su a 20, e dopo avere installato un ospedale da campo con numero di letti che variano tra il 5 ed il 500 in corrispondenza dell'epicentro.

(1.e) Determinazione delle subregioni a maggior rischio sismico

Un'analisi a scenario è stata eseguita per identificare le subregioni in Abruzzo a maggior rischio. Avendo preventivamente determinato che l'area sismogenetica 33 è la più importante per l'affidabilità complessiva, questa è stata divisa in 15 subregioni (figura 1) ed è stato quindi ricavato il valor medio della distanza per ferito, condizionato a terremoti in ciascuna delle subregioni.

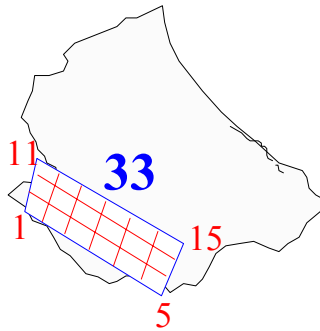


figura 7. Subregioni nell'area sismogenetica 33

Questo consente l'identificazione delle aree che hanno maggior bisogno della costruzione di nuovi ospedali; infatti, un valore elevato della distanza per ferito, condizionato all'epicentro in una delle subregioni, indica, nell'ipotesi di densità di popolazione costante, che le persone che vivono in quella subregione impiegheranno, in media, un tempo più lungo per arrivare ad un ospedale; e che l'ubicazione ottimale per un nuovo ospedale (con bassa fragilità) è quella subregione.

I risultati di questa analisi sono usati anche per determinare la distanza dall'epicentro degli ospedali che saranno probabilmente pieni. Questa informazione dovrebbe essere usata nelle strategie di protezione civile per progettare i piani di emergenza: i direttori sanitari dovrebbero avere istruzioni per inviare i feriti che non possono essere ricoverati al di fuori di quest'area.

Per ciascuna subregione è stato calcolato il valor medio del coefficiente di occupazione degli ospedali rispetto alla loro distanza dall'epicentro; si dovrebbe ricordare che il coefficiente di occupazione, in condizioni normali è ipotizzato pari al 70%.

L'analisi è stata fatta separatamente su ciascuna subregione per identificarne il comportamento; comunque, tutti le subregioni sembrarono dare all'incirca lo stesso risultato.

Le analisi (2) comprendono tre tipi di ricerca (2.a - 2.c):

(2.a) Calcolo della diminuzione del danno agli ospedali, in termini di valor medio di posti letto danneggiati, dopo l'adeguamento degli ospedali.

Questo è stato calcolato secondo:

$$i2a(H, F) = [b_H(0) - b_H(F)] \cdot [\lambda(33) + \lambda(34) + \lambda(35)] \quad (1)$$

in cui:

$b_H(0)$ = valor medio di posti letto danneggiati nell'ospedale H, senza intervento di adeguamento (curva di fragilità a livello 0), assegnato il livello dell'evento sismico

$b_H(F)$ = valor medio dei posti letto danneggiati nell'ospedale H, con intervento di adeguamento (curva di fragilità a livello F), assegnato un evento sismico

λ (n) = parametro di attività (numero medio di terremoti per anno) nell'area sismogenetica n

Il valore in (1) è il numero medio di posti letto guadagnati in un anno a causa per l'adeguamento dell'ospedale H a livello F. Questo dipende solamente dalla fragilità e dal rischio in ogni ospedale e non dal comportamento a sistema degli ospedali.

(2.b) Calcolo della diminuzione del danno negli ospedali, in termini di valor medio dei posti letto danneggiati dopo l'adeguamento degli ospedali uno alla volta, per unità di costo di adeguamento.

Per le ragioni esposte in (1.b), è stato anche deciso di considerare il valore di:

$$i2b(H,F) = [b_H(0) - b_H(F)] \cdot [\lambda(33) + \lambda(34) + \lambda(35)] \cdot \frac{1}{nb(H)} \quad (2)$$

Il quale restituisce il numero medio di posti letto guadagnati in un anno per l'adeguamento dell'ospedale H a livello F, per unità di costo (1 posto letto adeguato).

(2.c) Calcolo del numero di anni necessario perché l'intervento si ripaghi.

Il reciproco del valore in (2) restituisce l'approssimazione al primo ordine del numero medio di anni perché l'intervento di adeguamento si ripaghi.

Analisi 1.a, b: identificazione degli ospedali con massimo beneficio associato

La distanza media per ferito in condizioni normali è di 5 Km; questo valore cresce fino ad $r(0)=20.1$ Km (dopo un terremoto); il massimo miglioramento ottenibile, se l'adeguamento fosse fatto ad un livello tale che gli ospedali fossero non fragili, è il valore di $r(\infty)=11.7$ Km.

Il miglioramento, per ciascun ospedale e livello di adeguamento, è stato calcolato secondo la () ed è mostrato nelle figura XX e YY, e nelle figure dalla ZZ alla FF per le analisi normalizzate al costo (espressione WW).

I risultati della (1.a) mostrano che la classifica degli ospedali non cambia significativamente se si adegua a livello 1 o 2. I tre più importanti ospedali per questi casi sono i numeri 10, 2 e 3.

Un miglioramento considerevole è dato dai primi tre ospedali ($i1a(H,1) \geq 9.5\%$); dall'ottavo ospedale in avanti, $i1a \approx 3\%$ e rimane piccolo anche per il livello 2.

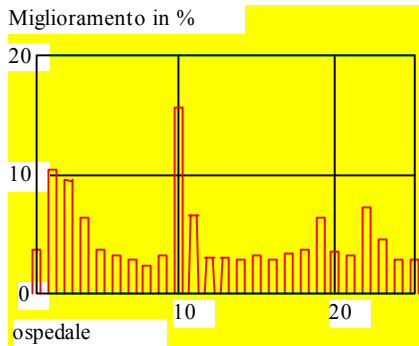


Figura 8. Miglioramento con fragilità a livello la 1

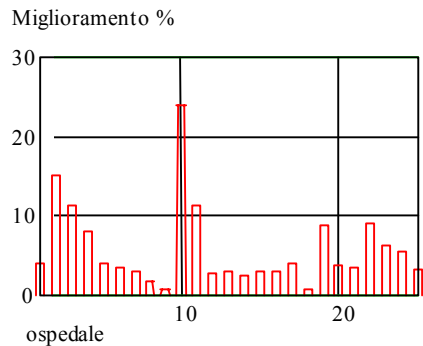
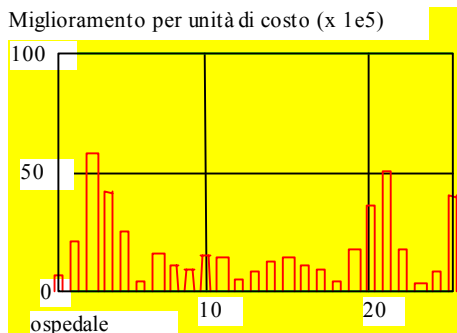
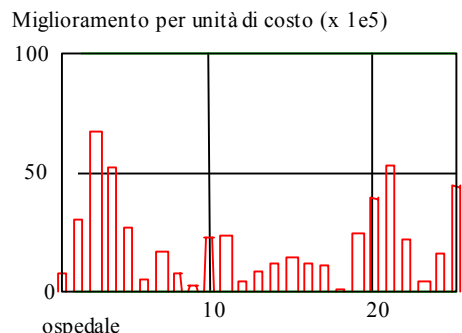


Figura 9. Miglioramento con livello la 2 fragilità

L'ospedale 10 è, come era da attendersi, il secondo più grande nella regione (si veda la tabella 1) mentre l'ospedale 2 è di grandezza media. L'importanza dell'ospedale 3, nel comune di Piscina, di dimensioni molto piccole ma in un sito con pericolosità alta, segnala che questo sarà fra i più importanti se si considera il miglioramento per unità di costo.



figuri 10 Miglioramento da unità di letto con livello la 1 fragilità

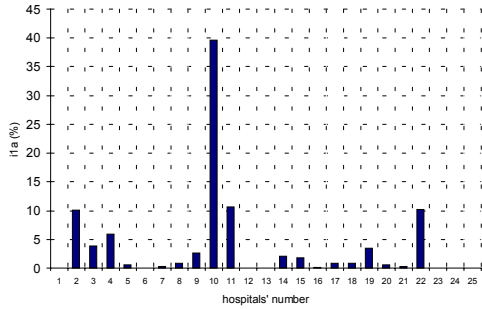


Figuri 11 Miglioramento da unità di letto con livello la 2 fragilità

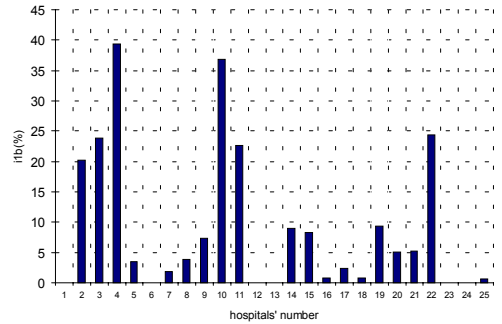
Infatti è il primo nelle analisi (1.b), e la parte rimanente della classifica cambia completamente rispetto a (1.a). Vi sono poi differenze trascurabili tra i risultati relativi all'adeguamento a livello 1 o 2. I tre ospedali più importanti sono i numero 3, 21 e 4.

Le analisi 1.b danno una migliore comprensione dei benefici ottenuti per unità di investimento. Gli interventi di adeguamento più efficaci sono quelli effettuati su ospedali in zone di alto rischio e densità. I primi cinque ospedali mostrano un valore di $ilb(H,1)$ maggiore di $35e-5$; valori maggiori di miglioramento (maggiori di $10e-5$) sono mostrati dai primi 16 dei 25 ospedali considerati. Inoltre, a causa della sismicità relativamente bassa della regione, dal XV ospedale in avanti l'adeguamento da livello 1 a livello 2 non comporta alcun beneficio.

I risultati relativi all'ipotesi di curve di fragilità distinte per ciascun ospedale sono mostrate in quanto segue.



Figuri 12: ila del miglioramento * con livello la 1 fragilità



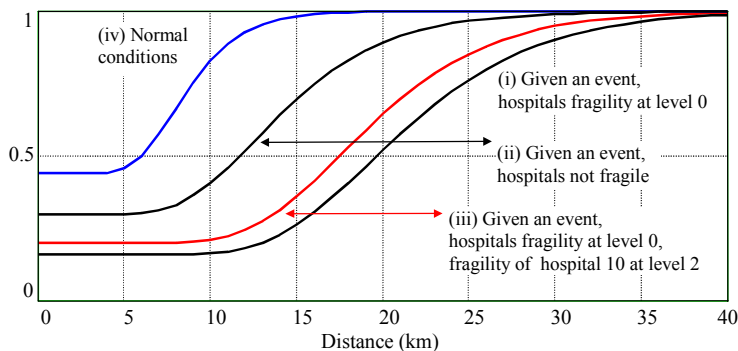
Figuri 13. Ilb del miglioramento * con livello la 1 fragilità

I tre ospedali più importanti per le analisi ila* sono i numeri 10, 22 e 2 mentre per ilb* sono il 4, 10 e 22. La caratteristica più importante di questi risultati è che la classifica cambia poco se sono considerati il miglioramento assoluto (ila*) o per unità di costo (ilb*). Questo differisce da quanto determinato con gli indici ila ed ilb; con questi sarebbero state fatte diverse scelte di adeguamento. Queste conclusioni sono comunque estremamente dipendenti dal problema e non possono essere generalizzate: l'unica conclusione generale (d'altra parte ovvia) è che è molto importante fare una valutazione accurata della fragilità degli ospedali.

Le distribuzioni cumulate (CDF) delle distanze per i casi 0 (curva i), ∞ (curva ii), per condizioni normali in Abruzzo (nessun terremoto, curva iv), e per l'adeguamento dell'ospedale 10, il più importante per l'analisi (1.a), a livello 2, sono riportate in figura 5.

La differenza tra la CDF della curva (iv) e quella della curva (ii) è dovuta al riempimento degli ospedali nell'area epicentrale; la differenza tra le curve (ii) e (i) è dovuta alla fragilità degli ospedali, e conseguente riduzione del numero di posti letto disponibili; la curva (iii) mostra un miglioramento rispetto alla situazione (i), anche con un solo ospedale adeguato.

CDF of distance



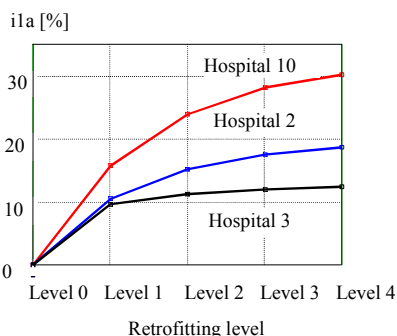
Figuri 14. Paragone di CDF di distanze

Analisi 1.c: l'identificazione del livello più conveniente di intervento di adeguamento

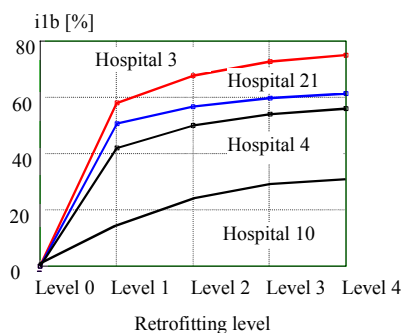
È intuitivo che il miglioramento complessivo dell'affidabilità del sistema è una funzione monotona crescente del livello di adeguamento. Il tasso di incremento, in termini di distanza per ferito è tuttavia una funzione decrescente del livello di adeguamento. Questo può essere già osservato dai risultati in figura XXX e YYY: il miglioramento per l'adeguamento dell'ospedale 10 a livello 1 vale il 15.7% del miglioramento massimo; l'adeguamento a livello 2 aggiunge un miglioramento relativo pari a $23.9\% - 15.7\% = 8.2\%$, circa la metà di quello al livello precedente.

E' stato quindi deciso di condurre un'analisi esaustiva con i tre più importanti ospedali secondo i risultati delle analisi (1.a), ovvero il 10, 2 e 3, e (1.b), ovvero il 3, 21 e 4. La fragilità di ciascun ospedale è stata spostata parallelamente a sé stessa di mezzo grado Percalli, come mostrato in fig. CC.

I risultati in termini di miglioramento quantificati attraverso la CC per gli ospedali 10, 2 and 3 and attraverso la CC per gli ospedali 3, 21 e 4 sono mostrati in figura CC e figura VV. Il miglioramento per unità di costo ilb di unità di letto è mostrato anche per l'ospedale 10, il più importante dall'analisi 1.a.



Figuri 15. ila come una funzione del livello di adeguamento



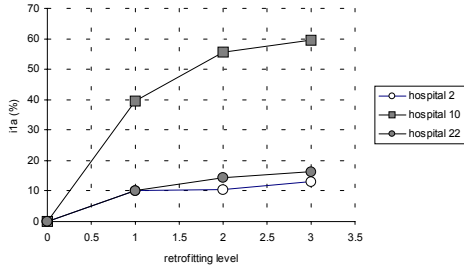
Figuri 16. ilb come una funzione del livello di adeguamento

Come commento generale, si può vedere, che l'andamento è verso un valore costante per adeguamenti di livello alto e che questo viene raggiunto ad un livello più basso per ospedali meno efficaci sul comportamento a sistema.

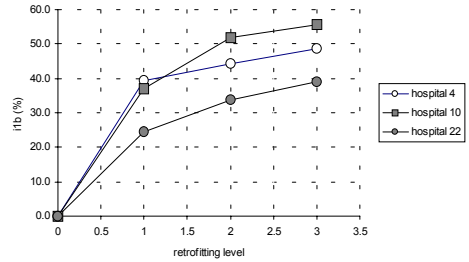
Ad esempio, con riferimento alla figura CC, i benefici derivanti dall'adeguamento dell'ospedale 10 sono significativi fino al livello 4 mentre l'adeguamento dell'ospedale 3 oltre il livello 1 provoca miglioramento minore.

Queste informazioni, se confermate per aree sismogenetiche diverse, indicherebbero che la strategia migliore è adeguare significativamente alcuni ospedali e fare interventi minori sui restanti. Comunque si deve notare che i risultati sono estremamente dipendenti dal problema; sembra ragionevole affermare che per più alte sismicità o densità abitativa o fragilità di ospedali, più, o forse tutti, ospedali avrebbero una funzione importante nel minimizzare la distanza percorsa dai feriti.

Ciò che accade per l'ipotesi di curve di fragilità distinte per più ospedali è mostrato nelle figure 13b e 14b



Figuri 17: l1a * (%) per livelli di adeguamento diversi



Figuri 18: l1b * (%) per livelli di adeguamento diversi

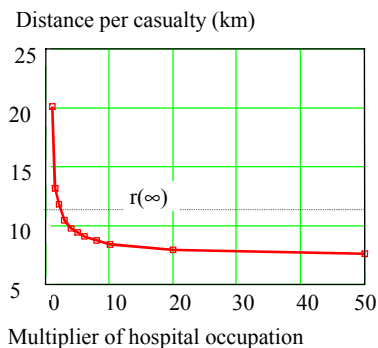
Questi valori sono in accordo con quanto trovato con l'ipotesi di fragilità comune, con l'importante differenza che il miglioramento raggiunge il valore costante a livelli di adeguamento più alti.

Analisi 1.d: determinazione dell'efficacia di comuni strategie di emergenza

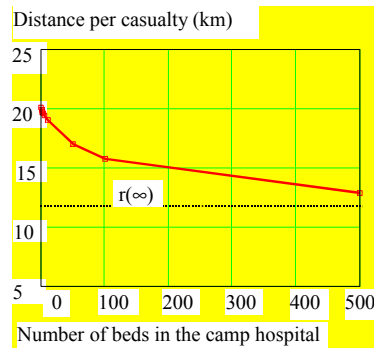
Due comuni misure di emergenza dopo un terremoto forte sono l'aumento della capacità nominale degli ospedali e l'installazione di un ospedale da campo nell'epicentro. Gli effetti di queste misure sono presentati in figura VV e DD.

La diminuzione nel valore della distanza media per ferito in seguito all'aumento dei posti letto in ogni ospedale è mostrato nella figura QQ; il rapporto tra capacità corrente e capacità nominale è stato definito moltiplicatore dell'occupazione.

E' chiaramente visibile un andamento decrescente; moltiplicatori maggiori di 5 sono irrealistici ma l'analisi è stata estesa fino al valore di 50 per determinare il comportamento asintotico.



Figuri 19. Miglioramento con aumento nell'occupazione di ospedali



Figuri 20. Miglioramento con campo ricovera in ospedale installazioni

Si può osservare che un aumento a circa 5 porta al valore di $r(\infty)$, ovvero al valore ottenuto nell'ipotesi di ospedali non fragili.

L'installazione di ospedali da campo è correntemente usata in alcuni paesi in modo esteso. In Francia, ad esempio la strategia corrente consiste nel disporre piccoli (25 posti letto) e grandi (500 posti letto) ospedali da campo portatili in tutto il paese (sono attualmente

sfruttabili 35 ospedali da campo piccoli e 20 grandi). Questi possono essere mossi e assemblati dove necessario in breve tempo.

E' stato così esplorato l'uso di un ospedale di campo fino a 500 posti letto assemblato nell'area epicentrale subito dopo il terremoto. I risultati sono in figura VV.

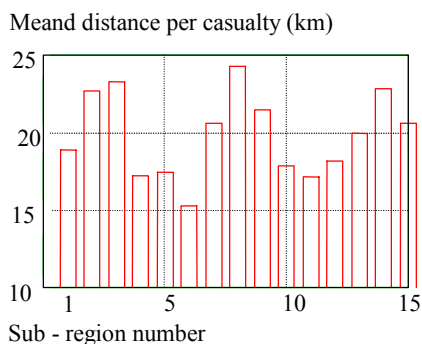
E' chiaramente visibile un andamento, con interessante miglioramento nel comportamento complessivo.

Si noti che l'installazione di ospedali da campo è particolarmente interessante fin dal momento che, sebbene il problema di giungere all'installazione può essere critico, questa misura può essere adottata immediatamente.

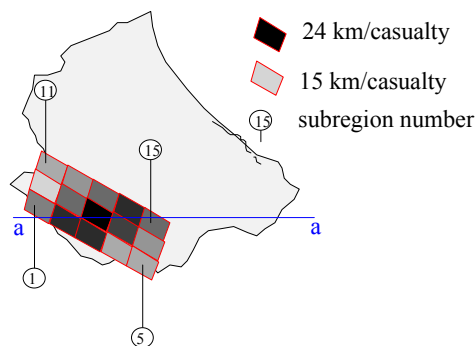
I risultati con l'ipotesi di funzioni di fragilità distinte per ciascun ospedale sono molto simili a questi e non sono qui mostrate.

L'analisi 1.e: identificazione delle subregioni a rischio più elevato

Il valor medio della distanza per ferito in ciascuna subregione dell'area sismogenetica 33 è mostrato in figura 10 e figura 11; valori sono, inoltre, ordinati in modo decrescente in tabella III.



Figuri 21. Medio distanza per ferito in subregioni 1-15



Figuri 22. Medio distanza per ferito in subregioni 1-15

Tabella III. Risultati delle analisi 1.e

subregion	8	3	14	2	9	7	15	13	1	12	10	5	4	11	6
ee															
distanza	24.	23.	22.	22.	21.	20.	20.	19.	18.	18.	17.	17.	17.	17.	15.
per ferito	3	3	9	7	4	6	6	9	9	2	8	4	2	2	3

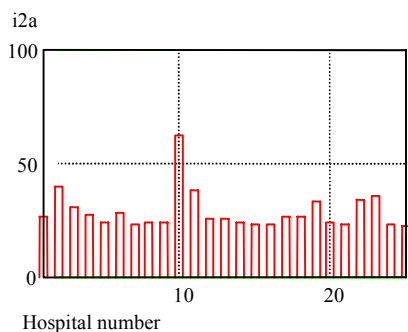
Si osservi innanzitutto che le medie nelle subregioni sono poco disperse attorno alla media generale (il massimo e minimo valgono rispettivamente la media generale = 20 km ± 5 km cioè la media ± 25%). Le situazioni peggiori sono allineate in direzione est - ovest (linea a-a in figura QQ) col valore peggiore nella subregione centrale. I risultati sono spiegabili se si considera che, essendo simile la densità di popolazione, gli abitanti delle subregioni occidentali sono più vicini agli ospedali rispetto agli abitanti delle subregioni centrale ed orientale. Gli abitanti delle subregioni orientali hanno, infatti, la possibilità di usare gli ospedali in Lazio e Molise.

Questa stessa analisi è stata usata per determinare l'andamento nel valore medio del coefficiente di occupazione (c.o.) degli ospedali in funzione della distanza dall'epicentro. Giacché questa analisi è pensata per essere rappresentativa della situazione per terremoti forti, la simulazione è stata fatta con una intensità minima di 9 MM. I risultati, non riportati qui per brevità mostrano che entro 50 km dall'epicentro il c.o. è uguale o maggiore del 98%, e che decresce linearmente a circa il 90% a 80 km dall'epicentro, indipendentemente dalla subregione considerata.

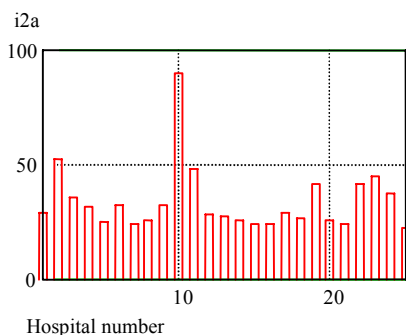
Analisi 2.a, b c: diminuzione del danno agli ospedali e numero di anni perché gli interventi di adeguamento si ripaghino

Il valor medio del numero di posti letto danneggiati per anno, per il sistema regionale nello stato attuale, vale 998; questo valore è stato confrontato con quelli ottenuti adeguando gli ospedali, uno alla volta, a livello 1 o 2. La differenza tra i due casi, calcolata secondo la XX, è la diminuzione media annua dei posti letto danneggiati.

I risultati sono mostrati nella figura XX e figura XX, per i livelli di adeguamento 1 e 2.

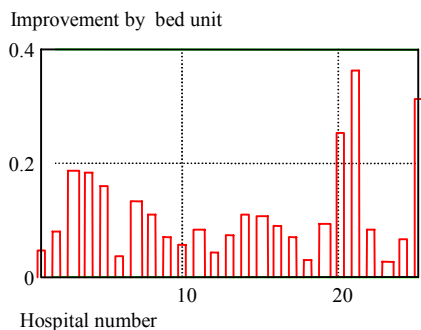


Figuri 23. Miglioramento con livello la 1 fragilità

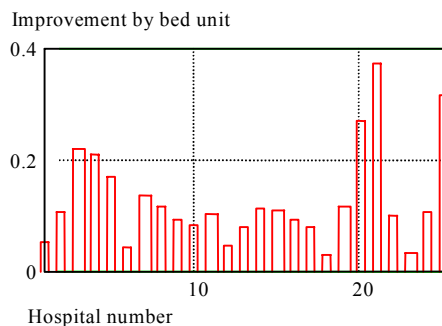


Figuri 24. Miglioramento con livello la 2 fragilità

Il guadagno annuale per ogni ospedale, diviso per il numero di posti letto, formula (2), restituisce il valor medio del guadagno per unità di costo (posto letto adeguato). I risultati sono mostrati nella figura XX e YY.

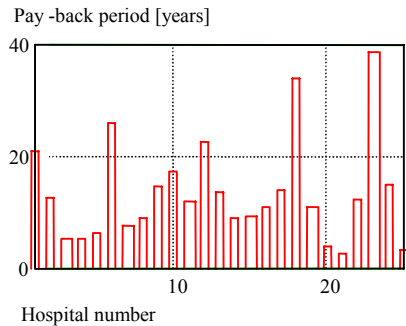


Figuri 25. Miglioramento da unità di letto con livello la 1 fragilità

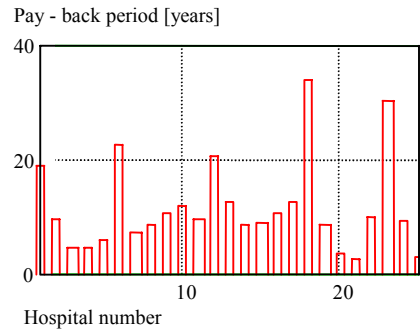


Figuri 26. Miglioramento da unità di letto con livello la 2 fragilità

Il reciproco del valore medio del guadagno annuale per unità di costo è l'approssimazione del primo ordine al numero di anni perché l'intervento si ripaghi. Questo indice è mostrato in figura XX e Figura XX, per ogni ospedale e per i livelli di adeguamento 1 e 2.



figuri 27. Paghi - indietro periodo con livello 1 adeguamento



Figuri 28. Paghi - indietro periodo con livello 2 adeguamenti

L'analisi (2.a) mostra che la classifica degli ospedali non cambia significativamente per adeguamento a livello 1 o 2. I tre più importanti ospedali sono il 10, 2 e 11. La classifica cambia quando si confrontano i miglioramenti a seguito di adeguamento per unità di costo (analisi 2.b), perché i tre più importanti diventano il 21, 25 e 20. Si noti che la classifica secondo queste analisi è ancora diversa da quelle ottenute nelle analisi precedenti.

Le analisi (2.c) mostrano che la situazione complessiva è piuttosto critica, dal momento che il numero di anni perché l'investimento si ripaghi è davvero piccolo. Si noti che questi risultati devono essere interpretati come la situazione media su un numero di anni elevato.

STRATEGIA DI INTERVENTO BASATA SU I RISULTATI OTTENUTI

Una possibile strategia di miglioramento sismico del sistema regionale può essere l'adeguamento di tutti gli ospedali a livello 1, e l'adeguamento a livello 4 solamente di un numero limitato. Tale strategia sembra abbastanza ragionevole in vista del fatto che il livello 1 può essere ottenuto nell'ambito delle usuali operazioni di manutenzione eseguite negli ospedali, con aumento di spesa trascurabile, mentre il livello 4 richiede un investimento non trascurabile e la parziale o totale chiusura della struttura.

Dal momento che la distanza per ferito, che descrive il comportamento degli ospedali come sistema, è un indice più informativo di quello dei soli danni diretti (perdite di posti letto), la scelta di quali ospedali adeguare a livello 4 è fatta sulla base dei risultati dell'analisi 1.b, al fine di massimizzare il beneficio per gli utenti (indici di tipo 1), per unità di costo dell'intervento (indice di tipo b).

Sono state considerate tre strategie:

- a. adeguamento degli ospedali con $i1b(H,2) \geq 50\%$, ovvero degli ospedali 3, 21 e 4 (i quali complessivamente hanno 379 posti letto)
- b. a. più l'adeguamento di ospedali con $i1b(H,2) \geq 30\%$, cioè il numero 25, 20 e 2, per un totale di 1047 posti letto
- c. a. più b. più l'adeguamento degli ospedali con $i1b(H,2) \geq 20\%$, cioè gli ospedali 5, 19, 11 10 e 22, per un totale di 3525 posti letto.

Tabella IV mostra il dà luogo a termini di distanza di medio per ferito ed associò ila dell'indice.

Tabella IV: miglioramenti per le diverse strategie di adeguamento

intervento	distanzi per ferito (Km)	ila (%)
livello generalizzato	1 15.71	52.3
un	14.9	61.9
b	13.9	73.8
c	11.8	98.8

Un miglioramento sostanziale è già ottenuto per l'intervento, dal costo molto basso, di adeguamento generalizzato al livello 1; gli altri interventi migliorano ulteriormente la situazione.

Se la strategia di intervento seguisse i risultati dell'analisi 1.a, invece, si adeguerebbe a livello 4 l'ospedale 10, (1073 posti letto \approx 1047 posti letto, l'intervento b. Questo porterebbe il valore della distanza media per ferito a 14.3 Km (ila=68%); il guadagno ottenuto usando i risultati dell'analisi 1.b sarebbe anche più evidente se si considerassero eventi sismici più intensi di quelli qui considerati.

Infine, se non venisse fatto l'adeguamento generalizzato a livello 1, si dovrebbero adeguare a livello 4 un minimo di 3'500 posti letto, ovvero adeguare tutti gli ospedali a livello c., per ottenere gli stessi risultati dell'intervento b. (1047 posti letto): il risparmio di risorse finanziarie è evidente.

CONCLUSIONI

Nel lavoro si è presentata una procedura per la valutazione della sicurezza sismica di un Sistema Regionale di ospedali. Il parametro principale assunto per misurare l'efficienza del sistema è la distanza media (MD) che ciascun ferito deve percorrere per arrivare ad un ospedale efficiente. Infatti, dopo un evento sismico, molti ospedali possono essere completamente o parzialmente fuori uso, mentre la richiesta di cure mediche ha un picco; gli ospedali attorno all'epicentro si riempiono quindi facilmente. L'indice MD usato è, nell'opinione degli autori, molto più informativo di altri che tengono conto soltanto dei danni diretti e dovrebbe contare in maniera importante nelle scelte di adeguamento.

Il metodo sviluppato è stato applicato ad un caso di studio, la regione Abruzzo in Italia; sono stati ottenuti diversi risultati di interesse:

- quale è il livello attuale della sicurezza del sistema
- quale ospedale o gruppo di ospedali dovrebbe essere adeguato prima; ovvero quali sono quelli i cui miglioramenti riducono maggiormente l'indice MD
- quale livello di adeguamento è più conveniente
- qual è l'effetto di alcune comuni misure di emergenza come l'installazione di ospedali da campo o l'incremento della capacità dell'ospedale.

I risultati mostrano una vulnerabilità alta per il sistema, la cui efficienza è ovviamente di grande importanza nella situazione post-terremoto. E' ottenuta una chiara classifica fra gli ospedali, da cui si deduce quali sono quelli più critici per il sistema.

Sono poi valutate le possibili strategie di adeguamento:

- adeguamento di un gruppo di ospedale ad livello alto, sulla base della classifica prima determinata;

- adeguamento di tutti gli ospedali ad un livello minimo, essenzialmente basato su semplici interventi su elementi non strutturali, e di pochi ospedali a livello alto

I risultati mostrano che la seconda scelta è molto efficace.

Nel lavoro sono state adottate un certo numero di ipotesi semplificative; queste possono essere facilmente rimosse senza cambiare la procedura.

Infine, la descrizione più accurata delle vie di comunicazione e della loro fragilità potrebbe essere di interesse, specialmente in regioni come quella qui considerata, dove l'orografia limita fortemente una distribuzione omogenea di strade sul territorio. Si dovrebbe considerare comunque che il modello può divenire molto meno facilmente gestibile rispetto a quello presentato qui.

Il metodo proposto sembra essere un interessante strumento decisionale per l'adeguamento un sistema di ospedali regionale ad un livello di sicurezza desiderato. Questo è un punto cruciale: è infatti noto che l'adeguamento sismico di ospedali esistenti è un problema insoluto nel mondo.

RINGRAZIAMENTI

La CEE, attraverso il contratto EV5V-CT93-0297 ed il GNDT, hanno parzialmente finanziato questo studio; il Servizio Sismico Nazionale italiano è ringraziato per la sua collaborazione.

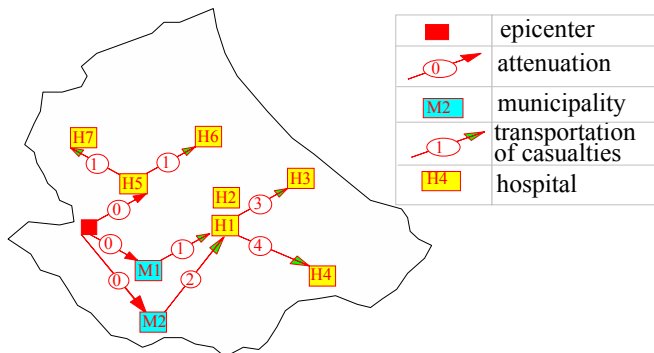
BIBLIOGRAFIA

1. Ang, A.H-S., Tang, W.H., Probability concepts in engineering planning and design, Volume 1, John Wiley & Sons, New York, 1975
2. Biondi, S., De Sortis, A., Di Pasquale, G., Nuti, C., Orsini, G., Sanò, T., Vanzi, I., Hospitals behavior during the September 1997 earthquake in Umbria and Marche (Italy), XII World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nuova Zelanda, 2000
3. Cète Méditerranée, 'Plan d'organisation des secours en cas de catastrophe sismique', *Dossier 96366/73*, 1996 Coburn.A, Spence R., *Earthquake Protection*, J. Wiley, 1992
4. Colozza R., De Marco R., 'Metodologie di utilizzo dei dati dell'atlante della classificazione sismica. Il Test Abruzzo', *Servizio Sismico Nazionale*, 3, 1988
5. DGXII European Commission, 'Hope: Seismic risk assessment and mitigation of hospital facility networks', *Contract EV5V CT93 0297*, Final Report STIN, (1997)
6. Ferrini, M., Nuti, C., Vanzi, I., Seismic risk assessment of two existing hospitals in Italy, XII World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nuova Zelanda, 2000
7. Giannini, R., Giuffrè, A., Nuti, C., Ortolani, F., Pinto, P.E. : 'Valutazione quantitativa del rischio sismico. Metodologie ed applicazione alla città di Subiaco', *Ingegneria Sismica*, Anno I, n. 1, 1984
8. ISTAT, Censimento della popolazione italiana, 1991
9. Monti G., Nuti C., 'A procedure for assessing the functional reliability of hospital systems', *Structural Safety*, Vol.18, No.4, (1996)
10. Nuti, C., Vanzi, I., Assessment of post-earthquake availability of hospital system and upgrading strategies, *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley and Sons, Stati Uniti, 27, pp. 1403-1423, 1998

11. Nuti, C., Vanzi, I., Seismic reliability of the Abruzzo hospital system and upgrading strategies, XII World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nuova Zelanda, 2000
12. Nuti, C., Santini, S., Vanzi, I., Seismic risk of the Italian hospitals, European Earthquake Engineering, n.1/2001, Patron editore, Bologna, 2001
13. Sanò T. Di Pasquale G., Orsini G., 'Seismic risk assessment and mitigation of hospital facility networks, Task1: Typical damage evaluation based on past earthquakes: Irpinia (1980), and Friuli (1976) earthquakes', *Rapporto ANPA-DISP within contract CEE EV5V CT93 0297*, (1994)
14. Nuti, C., Vanzi, I., earthquake hazard analysis software: GHOST. Assessment of post-earthquake availability of reGional HOSpiTal systems and choice of structural upgrading strategies, Il programma ed il manuale sono distribuiti su cd e su rete internet dal National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE) dell'Università della California a Berkeley, Stati Uniti, all'indirizzo: http://www.eerc.berkeley.edu/software_and_data/eng_soft/software/ghost.html

APPENDICE: UN ESEMPIO DELLA PROCEDURA ADOTTATA

Si esemplifica la procedura con il semplice sistema di figura XX. In questo sono presenti due comuni (M1 e M2) e sette ospedali (da H1 ad H7). I passi della procedura sono i seguenti:



Figuri 29. Esempio della procedura adottata

1. Un terremoto colpisce all'epicentro con intensità nota
2. Le intensità ai siti degli ospedali e dei comuni sono calcolate al tempo 0
Questo è indicato con le frecce che contengono il valore 0
3.
 - 3.1
 - 3.1.1 Viene calcolato il numero dei feriti nei comuni M1 ed M2
 - 3.1.2 Viene calcolato il danno strutturale negli ospedali.
H2 è pieno e riesce a curare tutti i pazienti già presenti. H5 deve trasportare alcuni dei feriti agli altri ospedali (passo 3.1.2); gli ospedali rimanenti non sono danneggiati
 - 3.2
 - 3.2.1 I feriti sono trasportati da M1 e M2 all'ospedale più vicino, H1, senza

informazioni sulla sua capacità di accoglienza; i feriti $M1 \rightarrow H1$ arrivano al tempo 1 mentre i feriti $M2 \rightarrow H1$ arrivano al tempo 2

3.2.2

I feriti che non possono essere ricoverati in H5 sono trasportati agli ospedali circostanti; alcuni di loro sono trasportati ad H6 finché è riempito, quindi sono trasportati ad H7

Al tempo 1 H5 e H6 sono pieni mentre H7 e gli ospedali da H1 ad H4 possono ancora accogliere pazienti.

4. Al tempo 2 i feriti $M2 \rightarrow H1$ arrivano ad H1; H1 si riempie e deve trasportare alcuni feriti agli altri ospedali.
5. H2 si riempie e ulteriori feriti sono trasportati in parte a H3, fino al suo riempimento; la parte rimanente è trasferita ad H4. I feriti $H1 \rightarrow H3$ giungono in H3 al tempo 3 mentre i feriti $H1 \rightarrow H4$ giungono al tempo 4
6. Alla fine della simulazione, il numero totale di posti letto danneggiati e la distanza media per ferito sono calcolati. Questi costituiscono i risultati di un esperimento. Se il c.o.v. di estimatori del valor medio degli indici di funzionamento è minore del valore prescritto, la procedura si ferma; altrimenti ricomincia dal passo 1