

3. VALUTAZIONE DELLA PERDITA DI FUNZIONALITÀ CON APPROCCIO AFFIDABILISTICO -

Interazione tra Componenti del Sistema Urbano: la Rete Viaria, gli Edifici, l'Emergenza

3.1 Introduzione

L'analisi dei sistemi a rete sta assumendo sempre maggior attenzione in Italia per l'importanza delle funzioni che essi svolgono in tempo di pace, in emergenza e durante il ripristino delle condizioni di vita post-evento. Esempi di recenti applicazioni sono contenuti in (Pinto et al. 2003, Save 2002, SSN-Unibas 2003, Sergisai 2001, Boni 2003), dove i diversi tipi di approccio proposti dipendono dall'ambito di analisi urbano, regionale o nazionale, e dalla descrizione qualitativa o quantitativa della rete.

L'analisi sismica di una rete urbana può essere collocata nell'insieme più ampio dell'analisi del comportamento sismico di un centro urbano. In generale il sistema urbano può essere visto come un insieme di sottosistemi, o funzioni, che devono essere garantiti con determinati livelli di servizio. Esempi di funzioni sono il sottosistema abitativo, sociale, dell'emergenza, dei trasporti e delle comunicazioni, dell'amministrazione, della sanità, economico e culturale. In via teorica è possibile definire per ogni funzione dei livelli di servizio, dipendenti da domanda e capacità del sottosistema e dagli standards accettati per gli stessi. In caso di sisma il danno fisico ad un oggetto del sottosistema (edificio, ponte, tubazione, cabina di trasformazione, ecc.) produce una variazione di capacità del sottosistema. Contemporaneamente il danno fisico a cui sono sottoposti altri oggetti del sistema urbano produce una variazione di domanda per i diversi sottosistemi.

Di conseguenza ogni sottosistema, variando di capacità e di domanda, presenta una variazione del livello di servizio. In questo, le interazioni tra vulnerabilità fisica e funzionale dei diversi sottosistemi portano a complesse relazioni tra sottosistemi. Come esempio della variazione di capacità, il collasso degli edifici su una strada può portare alla interruzione di un ramo viario, e quindi alla possibile sconnessione di un percorso di emergenza o all'aumento dei tempi di percorrenza per il trasporto di beni, influenzando, quindi, anche il sistema economico. Parimenti l'inagibilità di edifici in una certa zona può portare ad una variazione della domanda di traffico, in quanto in fase iniziale l'ammassamento e la delocalizzazione dei residenti produce una domanda immediata diversa da quella in condizioni normali, ma anche nel medio-lungo termine gli spostamenti saranno condizionati dalle nuove sedi attribuite ai senza tetto.

Le stesse considerazioni possono farsi per le altre reti. L'analisi del centro urbano potrebbe quindi ricondursi ad una analisi affidabilistica dei singoli sottosistemi interagenti tra loro, il risultato finale potendo essere un unico parametro olistico, con il pregio della sintesi, oppure un parametro multiscalare, caratteristico del funzionamento dei diversi sottosistemi.

La messa a punto di un simile modello, ad oggi, è cosa abbastanza ardua. Mentre la determinazione della capacità dei singoli sottosistemi in base al danno fisico è abbastanza consolidata, la domanda può dipendere da particolari strategie nel post-evento. Inoltre la mancanza di informazioni sugli oggetti dei singoli sottosistemi, la difficile quantificazione delle interazioni tra sottosistemi e la difficoltà di messa a punto di un modello olistico in cui pesino le diverse funzioni del sistema urbano, rendono, in questo settore, le analisi, ad oggi, ancora sporadiche e legate a specifici settori della ricerca.

Una ulteriore difficoltà deriva dal fatto che il modello di centro urbano dovrebbe essere evolutivo, nel senso che durante il ritorno alle condizioni pre-evento, la domanda e la capacità dei singoli sottosistemi variano nel tempo, in questo anche a seguito degli in-

terventi di riparazione sugli oggetti danneggiati dal sisma. Le principali fasi temporali sono rappresentate da: tempo di pace, impatto, emergenza e ripristino.

L'approccio che si seguirà nel seguito sarà, pertanto, quello di limitare l'analisi ad alcuni componenti del sistema urbano e ad alcune fasi del post-evento. In particolare saranno considerati il sistema abitativo, quello viario e quello dell'emergenza, finalizzando l'analisi alla valutazione dell'efficienza del sistema dell'emergenza tenendo conto della possibile interruzione di rami stradali dovuta al danneggiamento degli edifici prospicienti le vie di comunicazione.

3.2 Interazione tra rete viaria ed edifici

Il sistema viario viene modellato con un grafo descritto da rami e nodi (Fig.1). I rami collegano i nodi e possono essere percorsi in uno o in entrambi i sensi. Nei rami si mantengono costanti alcune grandezze riferibili sia alla geometria stradale, quali numero di sensi di marcia, numero di corsie, larghezza delle corsie, che alla vulnerabilità sismica del tratto, quali percorso in area di potenziale frana, con o senza edifici più alti della larghezza stradale, percorso su viadotto, in galleria, in trincea, ecc. Lungo i rami sono localizzati alcuni edifici, il cui danneggiamento può compromettere la funzionalità del ramo.

Gli edifici necessari alla gestione dell'emergenza, o che si ritiene debbano essere raggiunti dai soccorsi, sono, invece, individuati in alcuni nodi. In fase di prima emergenza interessa sostanzialmente la connettività della rete, mentre a medio e lungo termine interessa anche il livello di servizio e quindi la variazione della domanda e della capacità nei singoli tratti della rete. Nel seguito si considera per semplicità la sola fase immedia-

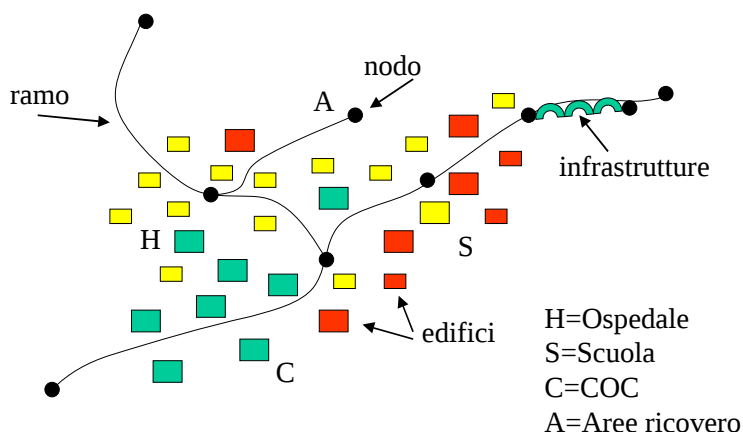


Figura 1. Modello di interazione tra sistema viario, degli edifici e dell'emergenza.

Una volta individuata una funzione obiettivo del tipo “raggiungibilità della scuola dalle vie di accesso” o “raggiungibilità dell'ospedale dalle aree di ricovero”, il problema può essere formalizzato nella verifica della connessione di due o più nodi della rete.

Il comportamento del generico ramo della rete viene assunto di tipo binario, caratterizzato dai due possibili stati alternativi 0=ramo funzionante, 1=ramo interrotto. Poiché non è certo il comportamento del ramo in caso di sisma, lo stato del ramo sarà considerato come una variabile aleatoria, comportando una analisi della rete di tipo affidabilistico.

Assumendo per le interruzioni di ogni ramo una distribuzione di Poisson, detto N_{ij} il numero medio di interruzioni per una data intensità sismica I (intensità macrosismica,

accelerazione spettrale, PGA, ecc.) risentita in maniera omogenea lungo il generico ramo, la probabilità di interruzione del generico ramo è data da:

$$P(i|I)=1-e^{-N_{i|I}} \quad (1)$$

Ipotizzando indipendenti le diverse cause di interruzione: frane, danno agli edifici, danno alle infrastrutture, danno alle opere di sostegno, ecc., (Figg. 2-3-4), il numero medio di interruzioni è dato dalla somma del numero medio di interruzioni prodotto delle singole cause:

$$N_{i|I}=\sum_s N_{i|s|I}$$



Figura 2. Strada ostruita da macerie di edificio (Umbria-Marche 1997)



Figura 3. Collasso di una campata di ponte (Loma Prieta 1989)



Figura 4. Deformazioni permanenti del suolo (Molise-Puglia 2002)

Nel seguito si concentra l'attenzione sui soli edifici ponendo $s=ed$. Indicando con N_{ed} il numero di edifici prospicienti il generico ramo, si ha:

$$N_{i|ed|I}=N_{ed} P(i|I)=N_{ed} \sum_T P(i|T|I) P(T) \quad (2)$$

dove $P(i|I)$ è la probabilità che un generico edificio porti all'interruzione del ramo condizionata all'intensità sismica, $P(i|T|I)$ la stessa probabilità condizionata ad una data classe tipologica T e $P(T)$ la distribuzione degli edifici in classi lungo il ramo in oggetto. Il generico edificio può essere causa di interruzione a secondo del suo livello di danno, assunto nel seguito come variabile discreta compresa tra 0 (assenza di danno) e 5 (collasso totale), del meccanismo di danno e del tipo di intervento eventualmente messo in atto. In particolare si considerano come possibili cause di interruzione la messa in opera di puntelli, il ribaltamento della facciata nel caso di collasso parziale ed il collasso totale, indicati nel seguito come $k=p$ (untelli), r (ibaltamento), c (ollasso).

Ognuno di questi eventi dipende dal danno d subito dall'edificio, a sua volta funzione della tipologia T dell'edificio e dell'intensità sismica risentita. Potendo essere considerati eventi disgiunti ed esaustivi per l'interruzione del ramo, ma dipendenti dal livello di danno dell'edificio, si ha:

$$P(i|T|I)=\sum_{k=p,r,c} P(i|k|T)P(k|T|I)=\sum_{k=p,r,c} \sum_{d=0,...,5} P(i|k|T) P(k|d|T) P(d|T|I) \quad (3)$$

Il termine $P(i|k|T)$ rappresenta la probabilità che avvenga una interruzione del tratto stradale data la messa in opera di un puntello, un ribaltamento di facciata o un collasso totale. E' un termine che dipende dalla geometria dell'edificio in relazione alla geometria stradale. Esso può, per il generico edificio, essere messo nella forma:

$$P(i|k|T) = H[b_{kT}/B_T - 1] / n_k \quad (4)$$

Con H funzione di Heavyside ($H[x] = 1$ per $x \geq 0$, 0 altrimenti), b_{kT} dimensione, normale all'asse stradale, dell'ingombro in pianta del puntello, della parete ribaltata o dell'edificio collassato, B_T distanza del piede degli edifici dalla sede stradale.

Dalla (4) l'inverso di n_k rappresenta la probabilità che il puntello, la parete ribaltata o l'edificio collassato vada ad interferire con la sede stradale prospiciente, una volta che la geometria lo consenta, cioè quando $H[b_{kT}/B_T - 1] = 1$. Nel caso, ad esempio, di collasso dell'edificio, n_k può essere visto come il numero di modalità di collasso per cui la sede stradale risulta effettivamente invasa, rapportato al totale delle modalità di collasso e tiene conto che l'edificio può collassare in verso opposto al ramo stradale su cui prospetta.

Nel caso, invece, di ribaltamento della facciata in un edificio a schiera, il ribaltamento può avvenire sulla facciata prospiciente il ramo stradale o su quella opposta, ma anche su entrambe. Tale aspetto verrà approfondito in un paragrafo successivo. Il termine b_{kT} può porsi nella forma $b_{kT} = \tan(\alpha_{kT}) h_{kT}$ con h_{kT} altezza caratteristica (altezza del puntello, altezza della parete che ribalta, altezza dell'edificio che collassa) e α_{kT} angolo con la verticale del puntello o della zona entro cui ribalta la parete o collassa l'edificio.

Il termine $P(k|d|T)$ rappresenta, invece, la probabilità che si verifichi l'evento $k=p, r, c$ dato il livello di danno d e la tipologia T dell'edificio. Esso può derivarsi dall'analisi dei provvedimenti di pronto intervento messi in opera dopo il sisma e dall'analisi dei meccanismi di danno riscontrati. L'ultimo termine, $P(d|T|I)$, è la consueta vulnerabilità fisica degli edifici o vulnerabilità primaria. Facendo riferimento alla definizione riportata in Di Pasquale e Goretti (2001), il termine

$$P(i|d|T) = \sum_{k=p,r,c} P(i|k|T) P(k|d|T)$$

rappresenta la vulnerabilità secondaria dell'edificio, la cui convoluzione con la vulnerabilità primaria fornisce la vulnerabilità totale $P(i|T|I)$. Nella (3) si assumeranno costanti, per tutti gli edifici della generica classe tipologica, i termini $P(k|d|T)$ e $P(d|T|I)$.

La precedente assunzione, propria di un approccio per classi di strutture, può essere giustificata dal numero generalmente elevato di edifici prospicienti un ramo stradale. Poiché, tuttavia, una classe tipologica non viene solitamente definita in relazione alle sue condizioni geometriche ed a quelle del ramo stradale, ma solo sulla base di fattori strutturali, il termine $P(i|k|T)$ potrebbe essere fortemente variabile da edificio ad edificio, anche all'interno della stessa classe di vulnerabilità. Ad esempio potrebbe verificarsi il caso di un solo edificio in prossimità del ciglio stradale. E' quindi necessario derivare il termine $P(i|k|T)$ almeno da una operazione di media sugli edifici di una data tipologia:

$$\underline{P}(i|k|T) = E[P(i|k|T)] = \sum_{j=1, N_{ed,T}} P_j(i|k|T) / N_{ed,T} \quad (5)$$

dove $N_{ed,T}$ rappresenta il numero di edifici di tipologia T prospicienti il ramo in oggetto. Le ipotesi precedenti potrebbero ancora non risultare corrette quando alcuni edifici, dalle particolari caratteristiche di vulnerabilità, si trovino in particolari condizioni geometriche nei confronti del ramo stradale. Ogni edificio dovrebbe, quindi, essere caratteriz-

zato da una diversa vulnerabilità e da una diversa geometria. In tal caso è sufficiente nella (2) far crescere il numero di classi tipologiche, al limite fino al numero di edifici.

Sostituendo la (3) nella (2) si ha

$$N_{i|edI} = N_{ed} \sum_T \sum_k \sum_d P(k|d|T) P(d|T|I) \underline{P}(i|k|T) P(T)$$

Per confronto con la (2), il termine $P(i|I)$ è pari a $\sum_T \sum_k \sum_d P(k|d|T) P(d|T|I) \underline{P}(i|k|T) P(T)$ e, come detto, rappresenta la probabilità che il generico edificio causi una interruzione del ramo stradale. Nella precedente espressione devono evidentemente essere rispettate le seguenti relazioni $\sum_T P(T)=1$; $\sum_d P(d|T|I)=1$ per $\forall T, I$; $\sum_k P(k|d|T) \leq 1$ per $\forall d, T$; $\underline{P}(i|k|T) \leq 1$ per $\forall k, T$; $\forall P \geq 0$.

Sulla base delle probabilità di interruzione dei singoli rami della rete viene sviluppata una analisi affidabilistica della rete stessa, tenendo conto che, pur essendo le singole interruzioni eventi indipendenti, le interruzioni dei possibili percorsi tra due nodi prefissati non sono eventi necessariamente indipendenti per la possibile presenza di uno stesso ramo all'interno di più percorsi. Viene pertanto effettuata una simulazione del comportamento della rete tramite analisi Montecarlo.

Per ogni rete generata vengono eliminati alcuni rami, a secondo della loro probabilità di interruzione, e viene eseguita una ricerca non ricorsiva del percorso, eventualmente minimo, tra due o più nodi prefissati (Lenzerini et al. 1989).

Il modello, al momento, non prevede alcuna dipendenza nel comportamento dei rami (stessa frana su più rami, collasso di un ponte su una strada sottostante o, caso più raro, collasso di un edificio su più rami).

3.3 Caratterizzazione del Modello

Gli edifici vengono suddivisi in classi di vulnerabilità secondo le seguenti tipologie strutturali, $T=A, B, C, Ca$, dove A, B e C rappresentano edifici in muratura di alta, media e bassa vulnerabilità e Ca edifici in cemento armato. La precedente classificazione è parzialmente derivata da quanto presente nelle scale macrosismiche MSK '76 (Medvedev 1977) e EMS '98 (Grunthal 1998). La determinazione della vulnerabilità primaria, cioè la distribuzione del danno fisico condizionato all'intensità sismica ed alla tipologia strutturale, viene desunta dal rilievo tipologico e del danno effettuato dopo il terremoto irpino del 1980 su circa 38.000 edifici. Nelle tabelle successive viene riportata la percentuale di edifici con un dato livello di danno e per le intensità macrosismiche di $I=VIII-IX$ MCS e $I=IX-X$ MCS (Angeletti et al. 2002):

Tabella 1a: Vulnerabilità primaria, $P(d|T|I)$, per $I_{MCS}=IX-X$ (Irpinia 1980)

	$d=0$	$d=1$	$d=2$	$d=3$	$d=4$	$d=5$
A	0.012	0.096	0.131	0.114	0.313	0.334
B	0.061	0.345	0.266	0.124	0.139	0.065
C	0.372	0.438	0.126	0.036	0.011	0.017
Ca	0.362	0.287	0.181	0.072	0.018	0.079

Tabella 1b: Vulnerabilità primaria, $P(d|T|I)$, per $I_{MCS}=VIII-IX$ (Irpinia 1980)

	d=0	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5
A	0.028	0.229	0.296	0.162	0.199	0.085
B	0.156	0.456	0.252	0.088	0.038	0.009
C	0.661	0.306	0.028	0.003	0.002	0.000
Ca	0.736(*)	0.230	0.028	0.003(**)	0.003	0.000

(*) valore osservato di 0.739, (**) valore osservato nullo, assegnato a posteriori

La probabilità di messa in opera di puntelli, dato il danno e la tipologia T, $P(k=p|d|T)$, viene derivata dalla casistica delle misure di pronto intervento riportate nelle schede di agibilità e danno.

Le schede compilate dopo l'evento di Umbria-Marche 1997 non contenevano le misure di pronto intervento. In occasione dell'evento Pollino '98 le misure di pronto intervento venivano descritte in appositi moduli separati e solo lo 0.8% delle schede riporta nelle note il termine puntelli, un numero troppo piccolo per poter essere credibile. Pertanto l'analisi viene limitata alle misure di pronto intervento riportate nelle schede di agibilità compilate in occasione dell'evento Molise 2002.

I risultati della statistica sono riportati nelle tabelle 2 e 3.

Tabella 2. Probabilità condizionata di messa in opera di puntelli, $P(k=p|d|T)$, Molise 2002

	d=0	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5
A	0.002	0.017	0.053	0.078	0.099	0.00
B	0.001	0.017	0.043	0.077	0.164	0.00
C	0.001	0.014	0.072	0.088	0.103	0.00
Ca	0.002	0.003	0.074	0.080(*)	0.090(*)	0.00

(*) valore osservato nullo, assegnato a posteriori

Tabella 3. Numero di edifici analizzati per determinare $P(k=p|d|T)$ in tabella 2.

	d=0	d=1	d=2	d=3	d=4
A	2192	6356	1397	1050	424
B	839	1391	207	143	61
C	829	836	83	57	29
Ca	1678	633	27	22	10

In tabella 2, gli zeri nell'ultima colonna sono zeri strutturali (anche se non osservati) in quanto, una volta collassato completamente, l'edificio non necessita di puntelli. I valori in corrispondenza del danno 3 e 4 per gli edifici in cemento armato sono stati assegnati a posteriori a seguito di valori non osservati, stante la modesta intensità del sisma del Molise 2002 ed il limitato numero di edifici in ca in zona epicentrale.

Dalla tabella 2, inoltre, si nota che il termine $P(k=p|d|T)$ non presenta differenze significative tra edifici in muratura di classe diversa, mentre pochi sono i dati per potersi esprimere sugli edifici in cemento armato.



Figura 5. Ribaltamento di facciata in edificio in muratura (Umbria-Marche 1997)



Figura 6. Puntello su due livelli (Molise 2002)



Figura 7. Collasso in direzione parallelo all'asse stradale (Kocaeli 1999).

La probabilità di ribaltamento di facciata, $P(k=c|d|T)$, viene assunta non nulla solo in corrispondenza del livello di danno 4, in quanto per livello di danno 3 non si raggiunge il collasso parziale e per livello di danno 5 si ha un collasso totale. La frequenza relativa di attivazione di meccanismi fuori dal piano viene desunta dal rilievi sul campo condotti recentemente dal GNDT sul Comune di S. Giuliano (Dolce et al. 2002). Il rilievo GNDT fornisce solamente la distribuzione marginale dei meccanismi di danno per le diverse classi di vulnerabilità, e non la distribuzione condizionata al danno. In prima approssimazione si assumerà, pertanto, che la distribuzione dei meccanismi di danno sia indipendente dal livello di danno stesso.

Analizzando i meccanismi fuori del piano di tipo 3, ribaltamento della parete intera, e 4, ribaltamento parziale della parete, si ottengono le seguenti percentuali indicative: Classe A: 12%, Classe B: 15%, Classe C: 10%. Il valore modesto di meccanismi fuori dal piano per edifici di classe A si spiega con la presenza non trascurabile di murature in laterizio forato, che pur presentando caratteristiche di vulnerabilità elevata, in relazione alla regolarità della tessitura ed alla connessione delle pareti attraverso cordoli o solai in ca, riducono il numero di meccanismi fuori dal piano a favore di quelli nel piano.

Pertanto i valori riportati in Dolce et al. (2002) vengono modificati come in tabella successiva:

Tabella 4. Probabilità condizionata di ribaltamento della facciata, $P(k=r|d|T)$, Molise 2002

	d=0,1,2,3	d=4	d=5
A	0.00	0.25	0.00
B	0.00	0.15	0.00
C	0.00	0.10	0.00
Ca	0.00	0.10	0.00

La probabilità di collasso condizionata ad un dato livello di danno e ad una data tipologia, $P(k=c|d|T)$, viene assunta pari all'unità per livello di danno 5 e per qualsiasi tipologia, e nulla negli altri casi, in quanto solo il livello di danno 5 rappresenta il completo collasso.

Tabella 5. Probabilità condizionata di collasso, $P(k=c|d|T)$

	d=3	d=4	d=5
A	0.00	0.00	1.00
B	0.00	0.00	1.00
C	0.00	0.00	1.00
Ca	0.00	0.00	1.00

Dalle tabelle 2, 4 e 5 si evince, come richiesto dal modello, che $\sum_k P(k|d|T) \leq 1$ per $\forall d$ e T .

Per quanto riguarda infine la probabilità media che i puntelli, i ribaltamenti o i collassi possano invadere la sede stradale, $\underline{P}(i|k|T)$, essa viene determinata come nel seguito descritto.

Puntelli, $k=p$: si assume una inclinazione del puntello con la verticale di $\alpha_{p1}=45$ gradi nel caso venga puntellato il primo livello e di $\alpha_{p2}=32$ gradi nel caso vengano puntellato il secondo livello. Detta h_j l'altezza di interpiano del generico edificio, si ha $b_{pT}=\max[h_j \tan(\alpha_{p1}), 2h_j \tan(\alpha_{p2})]=2h_j \tan(\alpha_{p2})$ per i valori di α_p assunti. In ciò si è assunto che il puntello interessi sempre due livelli, non conoscendo la reale distribuzione dell'altezza dei puntelli.

Si assumerà inoltre che, per il generico edificio, vi siano due possibili posizioni del puntello, corrispondenti alle due facciate di edifici a schiera, di cui una sola diretta verso il ramo stradale in oggetto.

Tenendo conto anche dell'eventuale puntellamento di entrambe le facciate si pone $n_p=3/2$ e quindi dalla (4) e dalla (5) si ha:

$$\underline{P}(i|k=p|T)=\sum_j P_j(i|k|T)/N_{ed,T}=2\sum_j H[2h_j \tan(\alpha_{p2})/B_j-1]/(3N_{ed,T})$$

Ribaltamento, $k=r$. Anche in questo caso, per mancanza di informazioni più specifiche, si considera che la parete interessata dal ribaltamento sia quella al livello superiore. Assumendo che il materiale della parete cada entro un angolo di $\alpha_r=35$ gradi con la verticale e considerando anche in questo caso il possibile ribaltamento, separato o congiunto, di due facciate dell'edificio, di cui una sola interessa il ramo stradale in oggetto, $n_r=3/2$, si ha:

$$\underline{P}(i|k=r|T)=\sum_j P_j(i|k|T)/N_{ed,T}=2\sum_j H[H_j \tan(\alpha_r)/B_j-1]/(3N_{ed,T})$$

Con H_j altezza del generico edificio.

Collasso, $k=c$: Si assume che il collasso dell'edificio avvenga entro un angolo di $\alpha_c=35$ gradi con la verticale. Considerando che il collasso può avvenire secondo tre modalità alternative, comprensive di una implosione, di cui una sola verso il ramo considerato, si assume $n_c=3$.

$$\underline{P}(i|k=c|T)=\sum_j P_j(i|k|T)/N_{ed,T}=\sum_j H(H_j \tan(\alpha_c)/B_j-1)/(3N_{ed,T})$$

Quanto sopra viene adottato per edifici in muratura, spesso aggregati a schiera. Gli edifici in cemento armato risultano generalmente isolati e quindi aumentano le modalità di messa in opera di puntelli, di ribaltamento e di collasso. Se le modalità sono disgiunte, come nel caso di collasso, n_c coincide con il numero di modalità. In questo caso si assumerà $n_c=5$. Se si hanno, invece, N_c modalità tra loro combinabili, come per la messa in opera di puntelli o per i ribaltamenti, il numero di possibili combinazioni è 2^{N_c} . Di queste solo la metà interessano il ramo stradale in esame. Inoltre lo spazio degli eventi

esclude l'assenza di ribaltamento o di messa in opera dei puntelli, quindi $n^{-1}=1/2 \cdot 2^{N_c}/(2^{N_c}-1)$. Considerando quattro ipotetiche facciate, $N_c=4$, si ha $n_p=n_r=15/8$.

Il modello richiede infine di determinare il numero totale di edifici prospicienti il ramo stradale. Esso può essere ottenuto per conteggio diretto nel caso si disponga di mappe catastali o tramite procedure automatiche con sistemi GIS. In via approssimata può essere anche ottenuto a partire dalla percentuale di edificato ai lati della strada, α_{ed} :

$$N_{ed}=2L\alpha_{ed}/b_{ed}$$

avendo indicato con L la lunghezza del ramo stradale, e con b_{ed} la dimensione media di un edificio. Il termine 2 tiene conto che gli edifici sono posti ai due lati della strada. Sulla base di quanto sopra la probabilità di interruzione del singolo ramo può essere posta come:

$$P(i|I)=1-e^{-rL}$$

dove si è omessa la dipendenza esplicita di r dall'intensità sismica, dalla distribuzione degli edifici in classi lungo il ramo, dalla geometria degli edifici in relazione alla geometria stradale e dalla densità edilizia sul ramo stesso.

3.4 Base dati ed Esempio applicativo

Il successivo esempio applicativo è stato sviluppato a partire dai dati di censimento LSU straordinario, che rappresenta il necessario completamento delle attività di rilievo del territorio, rispetto ai precedenti progetti LSU che avevano acquisito dati riguardanti soprattutto gli aspetti edilizi del territorio. Tre sono stati gli aspetti trattati nel progetto:

- censimento dati di vulnerabilità urbana, quali struttura morfologica dell'abitato, tipologie edilizie, vie di fuga, ecc.
- censimento di dati di vulnerabilità ed esposizione delle infrastrutture stradali e ferroviarie ricadenti all'interno dei centri urbani, comprese le vie di accesso.
- censimento dati di vulnerabilità ed esposizione delle reti di servizi urbani, lifelines, quali le condotte idriche, le fognature, le reti di distribuzione del gas, le reti elettriche.

Il livello di dettaglio del rilievo, e quindi il tipo di dato richiesto, ha dovuto necessariamente tener conto delle competenze tecniche dei rilevatori, della più o meno facile reperibilità del dato e del tempo a disposizione per il completamento del progetto. Poiché la maggior parte dei tecnici rilevatori era personale diplomato e poiché la durata prevista del progetto era, almeno inizialmente, di sei mesi, si è deciso di effettuare il censimento mantenendosi ad una descrizione di I livello.

Le reti sono state descritte in termini di grafo, in cui i singoli elementi dello stesso, nodi e rami, corrispondono ai diversi elementi della rete. Questo tipo di rappresentazione, se pur più complessa rispetto ad un semplice inventario degli elementi ricompresi nella rete, in quanto richiede l'individuazione delle connessioni, ha permesso di disporre di una più fedele rappresentazione della rete ai fini dell'analisi della stessa in esercizio ed in situazione di emergenza.

I dati raccolti nel corso del progetto LSU straordinario sono stati integrati con i dati raccolti nel progetto LSU-bis (MLPS-DPC-GNDT 2000), che ha riguardato il censimento di vulnerabilità dell'edilizia residenziale a campione con schede GNDT di I e II livello. In particolare è stato possibile desumere la descrizione dei componenti strutturali per le tipologie prevalenti, il numero di piani degli edifici e la loro età di costruzione.

Con la metodologia proposta è stata analizzata l'interazione tra sistema residenziale, del trasporto viario e dell'emergenza nel Comune di Vibo Valentia (35,000 abitanti). La scelta del Comune è stata dettata da due motivi, il primo collegato all'informatizzazione dei dati, tuttora in corso, in quanto il Comune di Vibo Valentia rappresenta uno dei Comuni in cui si hanno, ad oggi, più dati. Il secondo tiene conto della dimensione del grafo stradale.

Nel Caso del Comune di Vibo Valentia le rete stradale è stata rappresentata mediante un grafo con 177 rami, permettendo quindi di analizzare l'efficienza della metodologia su un grafo di dimensioni sufficientemente elevate.

Le successive analisi vengono condotte per due eventi si scenario, uniformi al sito, il primo caratterizzato da I=VIII MCS, il secondo da I=IX-X MCS. Per ognuno di essi viene analizzata la connettività della rete per due condizioni: nella prima sono presenti crolli e ribaltamenti di facciata, nella seconda si aggiunge la presenza dei puntelli.

La prima condizione è quindi rappresentativa dell'immediato post-evento (3-4 giorni) nel quale interessa portare i soccorsi alla popolazione colpita attraverso una rete stradale in cui non si è avuto modo di sgombrare le macerie, né di mettere in sicurezza gli edifici pericolosi.

La seconda condizione è meno realistica nel senso che la messa in opera di puntelli presuppone anche un certo sgombero delle macerie. Potrebbe, tuttavia, considerarsi rappresentativa di una situazione a circa 20 giorni, nel caso di sgombero delle macerie effettuato a rilento. In questa situazione, oltre alla connessione, potrebbe interessare anche il livello di servizio della rete.

Tale analisi non verrà, tuttavia, condotta in questo lavoro, limitandosi all'analisi della connessione della rete ed al confronto con il caso precedente. Il sistema dell'emergenza viene caratterizzato mediante alcuni edifici strategici o la cui accessibilità è considerata di importanza nell'emergenza. In particolare vengono considerati i tre circoli didattici relativi a scuole elementari, l'Ospedale Civile, la Caserma dei Vigili del Fuoco e i punti di accesso al centro urbano. Vengono quindi analizzate le seguenti funzioni obiettivo:

- Accessibilità di ciascuna scuola elementare dalla Caserma dei Vigili del Fuoco;
- Accessibilità dell'Ospedale da ciascuna scuola elementare;
- Accessibilità di ciascuna scuola dalle principali vie di accesso.

Essendo state individuate nel Comune più scuole elementari, le funzioni obiettivo vengono valutate non solo singolarmente, ma anche contemporaneamente per tutte le scuole, verificando, ad esempio, che tutte le scuole siano accessibili dalla Caserma dei Vigili del Fuoco.

Essendo state individuate nel Comune più scuole elementari, le funzioni obiettivo vengono valutate non solo singolarmente, ma anche contemporaneamente per tutte le scuole, verificando, ad esempio, che tutte le scuole siano accessibili dalla Caserma dei Vigili del Fuoco.

Nella Figura 9 è riportato il grafo rappresentativo della rete stradale di Vibo Valentia, con la localizzazione degli edifici di interesse precedentemente elencati. Il grafo è sovrapposto ad una ortofoto in maniera da poter valutare il grado di approssimazione del grafo rispetto alla effettiva rete stradale.

Nella figura sono anche evidenziate le aree omogenee, relativamente all'edificato residenziale. Vengono, da questo punto di vista, individuate due zone principali: Centro storico ed aree di completamento. Dal censimento di vulnerabilità dell'edilizia residen-

ziale LSU-bis vengono individuate le seguenti tipologie prevalenti nella Provincia di Vibo Valentia (207 edifici rilevati, di cui 88 in cemento armato):

Muratura: Tipologia prevalente 1. Muratura di pietra sbozzata con solai in legno e coperture in legno, di cui il 61% realizzato prima del 1919 e 6% tra il 1972 e 1981, numero di piani 2.

Muratura: Tipologia prevalente 2. Muratura di pietra sbozzata rinforzata con solai e coperture in laterocemento, di cui 88% realizzato tra il 1919 ed il 1945 e 12% prima del 1919, numero di piani da 1 a 3.

Cemento armato: Tipologia prevalente 1. Telai e solai in ca, con numero di piani da 2 a 5, di cui il 60% realizzati tra il 1972 ed il 1981.

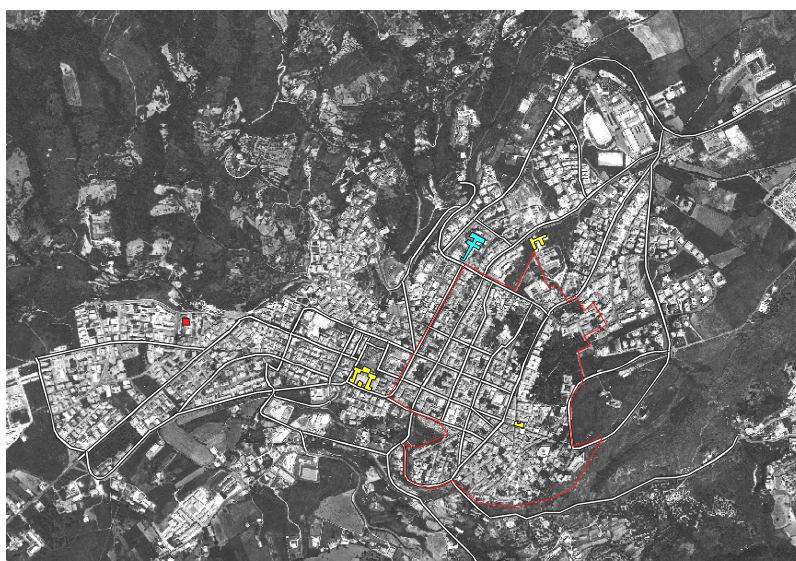


Figura 9. Grafo stradale di Vibo Valentia, con localizzazione dell'Ospedale Civile (azzurro), della Caserma VVF (rosso) e dei tre circoli didattici (gialli) delle scuole elementari.

Per quanto riguarda gli edifici in muratura, la tipologia prevalente 1 può essere attribuita alla classe di vulnerabilità A, mentre la tipologia prevalente 2 alla classe C. Gli edifici in cemento armato sono attribuiti alla classe di vulnerabilità Ca. Sulla base di quanto sopra vengono attribuiti alle due aree omogenee le seguenti distribuzioni di edifici in classi di vulnerabilità:

Tabella 6. Distribuzione degli edifici in classi di vulnerabilità per aree omogenee

Area omogenea	P(A)	P(B)	P(C)	P(Ca)
Centro storico	0.67	0.10	0.20	0.03
Aree di completamento	0.03	0.07	0.20	0.70

Sui singoli rami stradali la distribuzione degli edifici in classi di vulnerabilità viene determinata in funzione del grado di appartenenza del ramo ad una delle due zone omogenee.

Un ulteriore approfondimento necessita la valutazione del termine $\underline{P}(i|k|T)$ per $k=p,r,c$. Per quanto riguarda gli edifici in muratura esso era stato posto nella forma:

$$\underline{P}(i|k=p|T)=2\sum_j H[2h_j \tan(\alpha_{p2})/B_j-1]/(3N_{ed,T})= 2\sum_j H[2(H_j/N_{pj})\tan(\alpha_{p2})/B_j-1]/(3N_{ed,T})$$

$$\underline{P}(i|k=r|T)=2\sum_j H[H_j \tan(\alpha_r)/B_j-1]/(3N_{ed,T})$$

$$\underline{P}(i|k=c|T)= \sum_j H[H_j \tan(\alpha_c)/B_j-1]/(3N_{ed,T})$$

con N_{pj} numero di piani del generico edificio. Per gli edifici in cemento armato le relazioni sono simili, ma con diversi coefficienti. Dal rilievo degli edifici residenziali e dei rami stradali non è possibile determinare tale rapporto. Tuttavia dal rilievo delle reti stradali si conosce per ogni ramo il valore di H/B minimo e massimo, $(H/B)_m$ e $(H/B)_M$, indipendentemente dalla tipologia strutturale degli edifici prospicienti il ramo. Se si suppone che tale rapporto non dipenda dalla tipologia strutturale, nelle espressioni precedenti l'operazione di media sugli edifici può essere sostituita dalla media rispetto alla variabile $\beta_k H/B$, con β_k opportunamente definito a secondo dei casi ed in particolare $\beta_k=\tan(\alpha_r)$ per $k=r$, $\beta_k=\tan(\alpha_c)$ per $k=c$, $\beta_k=2\tan(\alpha_{p2})/N_p$ per $k=p$. Si indicherà nel seguito il valore di $\beta_k H/B$ minimo e massimo rispettivamente con $(\beta_k H/B)_m$ e $(\beta_k H/B)_M$. Per quanto sopra, per $k=r$ e per $k=c$, si ha $(\beta_k H/B)_m=\beta_k(H/B)_m$ e $(\beta_k H/B)_M=\beta_k(H/B)_M$. Non conoscendo, invece, la distribuzione congiunta di H/B e N_p , si assumerà, per $k=p$:

$$(\beta_p H/B)_m=2 \tan(\alpha_{p2})(H/B)_m/N_{pm}$$

$$(\beta_p H/B)_M=2 \tan(\alpha_{p2})(H/B)_M/N_{pm}$$

con N_{pm} e N_{pM} numero di piani minimo e massimo degli edifici, assunti nel seguito pari a 2 e 3. Assumendo una variazione lineare tra $(\beta_k H/B)_m$ e $(\beta_k H/B)_M$, si ha:

$$\underline{P}(i|k|T)=\delta_{k|T} \max(0, \min(1, ((\beta_k H/B)_M-1+\varepsilon)/(\max(\varepsilon, (\beta_k H/B)_M-(\beta_k H/B)_m))))$$

dove ε è un termine positivo, molto piccolo, introdotto per includere il caso $(\beta_k H/B)_M=(\beta_k H/B)_m=1$ e $\delta_{k|T}$ è una costante dipendente dalla tipologia strutturale T e dalla modalità, $k=p,r,c$, di interruzione del ramo stradale.

Il modello richiede, infine, la conoscenza della dimensione media, b_{ed} , degli edifici lungo il generico tratto stradale. In mancanza di dati più precisi, essa viene assunta pari a 15 m per gli edifici in muratura e a 20 m per quelli in cemento armato.

Per comprendere meglio i successivi risultati, si riporta in tabella 7 il valor medio, su tutta la rete, della probabilità che il generico edificio porti ad interruzione del ramo nelle due ipotesi di scenario e nell'ipotesi che i puntelli siano, o meno, stati messi in opera.

Tabella 7. Valor medio sulla rete della probabilità che il singolo edificio causi interruzione del ramo

Scenario	in presenza di effetto geometrico		in assenza di effetto geometrico, $\underline{P}(i k T)=1$	
	Collassi e ribaltamenti	Collassi, ribaltamenti e puntelli	Collassi e ribaltamenti	Collassi, ribaltamenti e puntelli
I=VIII-IX	0.0025	0.0035	0.0315	0.0494
I=IX-X	0.0101	0.0120	0.1427	0.1726

Dalla tabella 7 si evince che il ruolo dei puntelli è pari a circa il 40% nel caso di I=VIII-IX MCS e circa il 20% per I=IX-X MCS. Il risultato è in accordo con il fatto che, all'aumentare dell'intensità sismica, aumenta il numero di collassi parziali e totali e quindi diminuisce l'importanza relativa dei puntelli.

Nella tabella 7 si riporta anche la media, sempre sull'insieme dei rami stradali, della probabilità che un edificio possa interrompere il ramo su cui prospetta nell'ipotesi di assenza di effetto geometrico. Tale condizione si ha per $P(i|k|T)=1$, per $\forall k$ e T , e corrisponde, ad esempio, al caso in cui, dato che un edificio collassa, esso collassa verso la strada e in maniera tale da interrompere la stessa. Tale caso è ovviamente irrealistico, ma ha il pregio di distinguere l'effetto dovuto alla vulnerabilità fisica degli edifici dall'effetto geometrico.

Si nota che in assenza di effetto geometrico le probabilità aumentano di un ordine di grandezza, sottolineando quindi l'importanza delle fasce di rispetto degli edifici. Passando a livello di ramo (Tab. 8), l'effetto dei puntelli si riduce al 28% ed al 16% rispettivamente per la natura non lineare della (1).

La distribuzione della probabilità di interruzione dei rami nel caso di I=IX-X MCS e presenza contemporanea di collassi, ribaltamenti e puntelli fornisce per circa il 67% dei rami (120/177) una probabilità di interruzione nulla, per i restanti rami una probabilità generalmente inferiore a 0.3, e in pochi casi compresa tra 0.3 e 0.85.

Tabella 8. Valor medio sulla rete della probabilità di interruzione del ramo

Scenario	Collapsi e ribaltamenti	Collapsi, ribaltamenti e puntelli
I=VIII-IX	0.0189	0.0243
I=IX-X	0.0544	0.0613

Si riportano successivamente i risultati dell'analisi della rete in termini di probabilità di non soddisfacimento delle tre funzioni obiettivo, valutata generando 6000 reti. Le tabelle si riferiscono al solo caso di presenza di puntelli.

Tabella 9. Probabilità di interruzione della rete tra Caserma VVF e scuole elementari

Scenario	Circolo didattico I	Circolo didattico II	Circolo didattico III	Almeno un circolo didattico	Tutti i circoli didattici
I=VII-IX	0.0018	0.0023	0.0410	0.0413	0.0018
I=IX-X	0.1160	0.1262	0.2114	0.2180	0.1160

Tabella 10. Probabilità di interruzione della rete tra scuole elementari ed Ospedale Civile

Scenario	Circolo didattico I	Circolo didattico II	Circolo didattico III	Almeno un circolo didattico	Tutti i circoli didattici
I=VII-IX	0.00	0.00	0.0380	0.0380	0.00
I=IX-X	0.00	0.00	0.1122	0.1122	0.00

Tabella 11. Probabilità di interruzione della rete tra vie di accesso (sole strade statali) e scuole elementari

Scenario	Circolo didattico I	Circolo didattico II	Circolo didattico III	Almeno un circolo didattico	Tutti i circoli didattici
I=VII-IX	0.00	0.00	0.0450	0.0450	0.00
I=IX-X	0.00	0.00	0.0977	0.0977	0.00

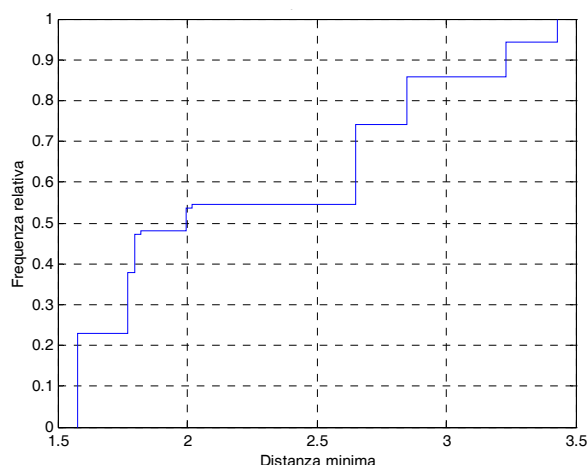


Figura 11. Distribuzione cumulata della distanza minima tra Caserma VV.F e III circolo didattico, condizionata al mantenimento della connessione e ad I=IX-X MCS

Nel caso di tabella 11 sono state considerate 4 vie di accesso, aggiungendo nella rete un nodo fittizio e 4 rami fittizi di collegamento alle 4 vie di accesso. Pertanto i risultati in tabella 11 sono da intendersi come probabilità di interruzione contemporanea dalle 4 vie di accesso.

Dai risultati precedenti si evince la maggior vulnerabilità del III circolo didattico nei confronti del collegamento sia con la Caserma dei Vigili del Fuoco che con l'Ospedale Civile e con le principali vie di accesso. Questo è dovuto alla localizzazione del circolo all'interno del centro storico dove gli edifici sono più vulnerabili e le vie più strette in relazione all'altezza degli edifici. Si nota inoltre come l'aumento di un grado nell'intensità di scenario produca differenze nella probabilità di interruzione fortemente variabili a seconda della funzione obiettivo. Queste sono massime per il collegamento Caserma VV.F e scuole.

Il modello permette anche di determinare la distanza minima da percorrere tra la Caserma VV.F e III circolo didattico, che, nell'ipotesi di rete integra, è pari a $D_{min}=1.57$ Km. In Figura 10 si riporta la distribuzione cumulata della distanza minima, condizionata al mantenimento della connessione tra Caserma VV.F e III circolo didattico, nel caso di I=IX-X MCS. Il valor medio della distanza minima è pari a $E[D_{min}]=2.26$ Km, mentre nel 15% dei casi circa tale distanza supera i 3 Km. E' quindi

possibile calcolare la probabilità che la distanza minima almeno raddoppi, condizionata ad I=IX-X MCS. Essa vale $P=0.2114+(1-0.2114)*0.15\approx 0.33$, comprendendo il caso di distanza infinita corrispondente alla sconnessione del percorso.

I precedenti risultati, ottenuti per due differenti intensità di scenario, possono essere scondizionati rispetto all'evento di scenario attraverso una convoluzione con la pericolosità dell'area, riportata in tabella 12. L'analisi di rischio conduce ad una probabilità totale di interruzione del collegamento tra Caserma dei VV.F e III circolo didattico di circa il 6% in 50 anni.

Tabella 12. Intensità macrosismica nel Comune per pre-assegnati periodi di ritorno

Tr(anni)	48	98	475	975	2475
I_MCS	6.69	7.74	9.66	10.26	10.88

Valori calcolati in Albarello et al. (2003) tenendo conto della dispersione sulle curve di attenuazione, come riportato in Peruzza (2000)

3.5 Conclusioni

L'analisi delle componenti di un sistema urbano e delle loro interazioni in caso di sisma è un aspetto che sta assumendo sempre maggior attenzione nella pianificazione dell'emergenza.

Nel lavoro è stato proposto un modello di interazione tra sistema residenziale, sistema dell'emergenza e sistema di comunicazione stradale. A fronte di un comportamento evolutivo in cui domanda e capacità dei diversi sistemi variano nel tempo in funzione delle fasi dell'emergenza e del ripristino delle attività, è stato analizzato il solo periodo a breve termine in cui interessa, più che il livello di servizio della rete stradale, la connettività della stessa. In questo caso edifici puntellati e totalmente o parzialmente collassati possono invadere la sede stradale rendendo non percorribile il relativo ramo.

E' stata introdotta una vulnerabilità primaria, data dal danno fisico agli edifici prospicienti un generico tratto stradale, ed una vulnerabilità secondaria data dalla probabilità di interruzione del ramo condizionata al danno fisico degli edifici. Quest'ultima dipende dall'effettivo svilupparsi di meccanismi di collasso parziale o totale e dalla messa in opera di puntelli, oltre che da un aspetto geometrico funzione anche del rapporto altezza/distanza degli edifici dalla sede stradale.

Per tener conto della aleatorietà nel comportamento degli edifici, viene sviluppato un approccio affidabilistico della rete con simulazione alla Monte Carlo. La taratura del modello è stata effettuata con dati di rilievo post-evento raccolti nei recenti eventi sismici italiani.

L'applicazione ad un caso concreto è stata condotta sul Comune di Vibo Valentia a partire dai dati di censimento LSU-2 e LSU-straordinario che hanno messo a disposizione indicatori di vulnerabilità relativamente all'edilizia residenziale ed alle reti di infrastrutture e servizi. Trattandosi di centro urbano di non elevate dimensioni si è assunto uno scenario sismico uniforme sulla rete. Limitatamente al caso esaminato si possono trarre le seguenti conclusioni

- l'interazione tra sistema residenziale, stradale e dell'emergenza diventa significativa per intensità macrosismiche superiori al IX grado. Per intensità minori, il limitato numero di collassi parziali e totali rende il problema poco significativo;
- i puntelli hanno un influenza variabile dal 20% al 40% (in dipendenza della funzione obiettivo) sulla probabilità che il generico edificio porti ad interruzione il ramo stradale. Tale influenza si riduce a circa il 15% e 30% quando si consideri la probabilità di interruzione di un ramo stradale;
- l'effetto geometrico, comprensivo sia delle diverse direzioni di collasso che del rapporto tra altezza edificio e distanza dalla sede stradale, riduce di un ordine di grandezza la probabilità che il generico edificio possa interrompere il ramo stradale. tale aspetto conferma l'importanza delle aree di rispetto degli edifici;
- anche nel caso di mantenimento della connessione tra due punti della rete, l'aumento della distanza minima può essere significativo.

Per gli sviluppi futuri si ritiene necessario introdurre nel modello una correlazione spaziale del danno in maniera da evitare che, per rami particolarmente lunghi e, quindi, con molti edifici prospicienti, si giunga inevitabilmente alla certezza dell'interruzione in caso di sisma.