



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale - ICEA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea

*Analisi della vulnerabilità sismica dei sistemi di
trasporto: misure di prestazione delle reti stradali*

Relatore:

Ch. mo Prof. Ing. Massimiliano Gastaldi

Correlatore:

Ing. Gregorio Gecchele

Laureanda:

Eleonora Gioachini

Anno Accademico 2013-2014

Alla mia famiglia

Ad Alberto

Indice**Elenco delle figure****Elenco delle tabelle**

1	INTRODUZIONE	15
2	ANALISI DI VULNERABILITÀ DI RETI STRADALI	17
2.1	Valutazione del rischio.....	17
2.1.1	Il sistema dei trasporti come lifelines.....	17
2.1.2	I rischi sulle infrastrutture di trasporto.....	18
2.1.3	Equazione del rischio.....	20
2.1.4	Valutazione della pericolosità.....	22
2.1.5	Valutazione dell'esposizione.....	23
2.2	Valutazione della vulnerabilità.....	25
2.2.1	Definizioni di vulnerabilità.....	25
2.2.1.1	Definizione di vulnerabilità di una rete stradale	27
3	STUDIO DELLA VULNERABILITA' SISMICA IN UNA INFRASTRUTTURA STRADALE.....	31
3.1	Il rischio sismico e le sue componenti.....	31
3.1.1	Vulnerabilità sismica e modelli di trasporto	34
3.2	Metodologie per la valutazione della vulnerabilità.....	41
3.2.1	Perditempo e costi di viaggio	41
3.2.2	Capacità di rete.....	54
3.2.3	Raggiungibilità della rete	55
4	MODELLAZIONE DELLA DOMANDA DI VIAGGIO.....	63

4.1	<i>Rassegna dei modelli di domanda presenti in letteratura</i>	63
5	<i>MODELLAZIONE DELLA RIDUZIONE DI FUNZIONALITA' NEGLI ARCHI DI UNA RETE STRADALE A SEGUITO DI UN SISMA</i>	67
5.1	<i>Strutture puntuali (ponti)</i>	67
5.1.1	<i>Relazione tra danno e funzionalità di un ponte</i>	70
5.2	<i>Strutture diffuse (edifici affacciati su strada)</i>	71
6	<i>PROCEDURE DI MITIGAZIONE – RETROFITTING</i>	75
6.1	<i>Impostazione delle procedure</i>	75
6.1.1	<i>Sistemi Informativi settoriali</i>	76
6.1.2	<i>Valutazione dello stato di danno</i>	77
6.1.3	<i>Analisi del sistema di trasporto</i>	77
6.1.4	<i>Strategia di retrofitting</i>	78
7	<i>CASO STUDIO: RETE URBANA DI CONEGLIANO (TV)</i>	79
7.1	<i>Inquadramento del problema</i>	79
7.2	<i>Analisi della rete</i>	80
7.2.1	<i>Dati di input</i>	81
7.2.1.1	<i>Modello della rete stradale</i>	81
7.2.1.2	<i>Matrice degli spostamenti</i>	82
7.2.1.3	<i>Ubicazione, scenari di danneggiamento e costi di adeguamento sismico dei ponti considerati</i>	83
7.2.2	<i>Analisi dei risultati – Confronto tra scenari sismici</i>	89
7.2.2.1	<i>Analisi degli indicatori nei diversi scenari</i>	89
7.2.3	<i>Analisi dei risultati – Confronto tra strategie di retrofitting</i>	95

7.2.3.1	<i>Scenario sismico di riferimento e vincolo di budget.....</i>	95
7.2.3.2	<i>Ipotesi di intervento preventivo.....</i>	95
7.2.3.3	<i>Calcolo degli indicatori di vulnerabilità</i>	96
8	CONCLUSIONI	101

Riferimenti bibliografici

Ringraziamenti

Elenco delle figure

<i>Figura 1 Curva di rischio.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2 Curve di isorischio</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3 Schema riassuntivo per la modellazione di una rete stradale</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4 Struttura di una matrice origine-destinazione</i>	<i>35</i>
<i>Figura 5 Strada parzialmente bloccata durante il sisma di Modena (maggio 2012).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 6 Strada resa completamente inutilizzabile dal sisma dell'Aquila (aprile 2009)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7 Esempi di griglie di dimensioni differenti.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 8 Esempio di rete</i>	<i>59</i>
<i>Figura 9 Esempio di curva di fragilità di un ponte</i>	<i>68</i>
<i>Figura 10 Schema rappresentativo</i>	<i>72</i>
<i>Figura 11 Architettura della procedura integrata.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 13 Ponti geolocalizzati nel comune di Conegliano con le relative coordinate geografiche</i>	<i>80</i>
<i>Figura 13 Grafo della rete stradale.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 14 Estratto della matrice di domanda degli spostamenti.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 15 Ponti multi-campata per i quali è stato proposto un costo di adeguamento sismico</i>	<i>87</i>
<i>Figura 16 Istogramma che riporta il valore dell'importanza per ogni scenario (pesi pari a 1)</i>	<i>90</i>
<i>Figura 17 Istogramma che riporta il valore dell'importanza per ogni scenario (pesi pari alla domanda)</i>	<i>90</i>
<i>Figura 18 Istogramma che riporta il valore dell'efficienza per ogni scenario</i>	<i>91</i>
<i>Figura 19 Istogramma che riporta il valore della vulnerabilità per ogni scenario.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 20 Istogramma che riporta il valore di NRI per ogni scenario</i>	<i>92</i>

<i>Figura 21 Istogramma che riporta il valore delle prestazioni della rete per ogni scenario.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 22 Istogramma che riporta il valore della lunghezza della rete per ogni scenario</i>	<i>94</i>
<i>Figura 23 Istogramma che riporta il valore di importanza per ogni ipotesi (pesi pari a 1)</i>	<i>96</i>
<i>Figura 24 Istogramma che riporta il valore di importanza per ogni ipotesi (pesi pari alla domanda)</i>	<i>97</i>
<i>Figura 25 Istogramma che riporta il valore dell' efficienza per ogni ipotesi.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 26 Istogramma che riporta il valore di vulnerabilità per ogni ipotesi.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 27 Istogramma che riporta il valore di NRI per ogni ipotesi.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 28 Istogramma che riporta il valore delle prestazioni della rete per ogni ipotesi.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 29 Istogramma che riporta il valore della lunghezza della rete per ogni ipotesi</i>	<i>99</i>

Elenco delle tabelle

Tabella 1 Classificazione dei rischi sulle infrastrutture	19
Tabella 2 Valutazione finale del rischio	22
Tabella 3 Approcci per la valutazione della pericolosità.....	23
Tabella 4 Tipologie di esposizione al rischio.....	25
Tabella 5 Tipologie e relative definizioni di vulnerabilità.....	27
Tabella 6 Definizione della vulnerabilità secondo alcuni autori	30
Tabella 7 Classificazione dei modelli di assegnazione.....	37
Tabella 8 Categorie dei centri di servizio	53
Tabella 9 Indici proposti per la valutazione della vulnerabilità	61
Tabella 10 Funzionalità del ponte a diversi livelli di danno e tempo di recupero	70
Tabella 11 Valutazione delle classi di indice di vulnerabilità geometrica I_{vg}	72
Tabella 12 Valutazione degli indici di danno degli edifici (I_{de}).....	74
Tabella 13 Valutazione delle classi di indici di danno complessivo (I_{dc}) della strada	74
Tabella 14 Indici di danneggiamento dei ponti selezionati.....	84
Tabella 15 Capacità residue del ponte in funzione del danno.....	84
Tabella 16 Capacità residua degli archi in funzione al LDI	85
Tabella 17 Capacità residue dei ponti di Conegliano	86
Tabella 18 Costi di adeguamento sismico.....	88
Tabella 19 Capacità residue dei ponti a seguito del sisma senza adeguamento dei ponti.....	88
Tabella 20 Capacità residue dei ponti a seguito del sisma con adeguamento sismico	88
Tabella 21 Ponti che devono essere adeguati per avere un'evacuazione in 30 minuti	95
Tabella 22 Ipotesi di intervento alternative con budget di 82000 euro	96

Tabella 23 Tabella riassuntiva sulle prestazioni delle diverse ipotesi 99

*“Se non puoi essere una via maestra, sii un sentiero.
Se non puoi essere il sole, sii una stella.
Sii sempre il meglio di ciò che sei.”*

Martin Luther King

1 INTRODUZIONE

È opinione condivisa che l'efficienza e l'affidabilità del sistema dei trasporti incida significativamente sull'economia di un territorio, poiché deve essere in grado di garantire l'accessibilità e il "movimento" di persone e merci in modo sicuro ed efficiente. Anche in caso di eventi catastrofici diffusi, quali sisma o alluvioni, è essenziale che la rete di trasporto rimanga operativa o che la sua funzionalità venga ripristinata nel più breve tempo possibile. In particolare l'esperienza ha mostrato come troppo spesso il danno da evento sismico agli elementi della rete stradale può influire negativamente sulle attività di emergenza post-sisma e di soccorso e generare un impatto negativo sulla ripresa economica della zona colpita.

Tuttavia questi aspetti sono stati a lungo trascurati nelle fasi progettazione, costruzione e manutenzione dei sistemi di trasporto e solo recentemente è divenuta chiara l'importanza di effettuare analisi preventive che forniscano una valutazione dei rischi sulle reti viarie esistenti. La valutazione della vulnerabilità sismica delle reti di trasporto, e di quelle stradali in particolare, permette di stimare gli effetti prodotti da un sisma su una particolare rete di trasporto e fornire indicazioni utili per la pianificazione di interventi di adeguamento delle infrastrutture esistenti.

Dal punto di vista di un ingegnere dei trasporti, questa tipologia di analisi richiede particolare attenzione nella fase di sviluppo di modelli di simulazione adeguati, a causa della complessità dei fenomeni descritti rispetto alla domanda di spostamento, l'offerta di trasporto, l'interazione domanda-offerta e le misure di prestazione del sistema.

La presente tesi si pone l'obiettivo di valutare lo stato dell'arte sul tema della vulnerabilità sismica delle reti stradali, con una specifica attenzione al tema delle misure di prestazione e degli indicatori di vulnerabilità. L'analisi è stata completata dall'implementazione di tali indicatori con riferimento al sistema costituito dalla rete viaria della città di Conegliano, in provincia di Treviso.

Il lavoro è strutturato come segue: nel prossimo capitolo vengono introdotte alcuni concetti generali relativi alla valutazione del rischio e alla vulnerabilità delle reti stradali. Nel terzo capitolo si approfondisce il tema della vulnerabilità sismica delle reti stradali, introducendo gli aspetti modellistici più rilevanti e descrivendo nel dettaglio i più importanti indicatori di vulnerabilità. Nel quarto e quinto capitolo si approfondiscono le tematiche della domanda e dell'offerta di trasporto nelle condizioni post-sisma, con una particolare attenzione al tema della modellazione della riduzione di funzionalità degli archi stradali. Nel sesto capitolo si descrive l'approccio-tipo seguito nelle procedure di mitigazione e retrofitting, finalizzate ad identificare strategie ottimali di

intervento preventivo sull'infrastruttura. Nel settimo capitolo viene infine presentato il caso di studio e l'implementazione dei più importanti indicatori di vulnerabilità su diversi scenari sismici e ipotesi di retrofitting alternative.

2 ANALISI DI VULNERABILITÀ DI RETI STRADALI

Le reti stradali costituiscono una componente importante della struttura di un paese, per questo motivo è necessario studiarle in modo approfondito soprattutto nel caso in cui possano manifestarsi eventi che ne metterebbero in discussione la funzionalità. Nel seguente capitolo verranno esposte alcune informazioni di carattere generale che permettono un'introduzione a questo problema.

2.1 Valutazione del rischio

Il rischio è definito come “*l'eventualità di subire un danno connessa a circostanze più o meno prevedibili*” [1]. Come indicato dalla protezione civile [2] l'Italia è un paese ad elevato rischio per diverse tipologie di eventi naturali (terremoti, alluvioni, frane, eruzioni vulcaniche ed incendi) ed attività umane. Per questo motivo è stato istituito con la legge n. 225/92 il Servizio Nazionale di Protezione Civile, che ha il compito di porre in essere attività di previsione/prevenzione delle varie ipotesi di rischio, attività di soccorso e qualsiasi altra attività necessaria al superamento delle situazioni di emergenza. Gli ambiti di intervento sono eventi naturali o legati all'attività umana che possono essere affrontati mediante l'attività dei singoli enti o di più amministrazioni competenti in via ordinaria, oppure eventi che richiedano mezzi e poteri straordinari.

2.1.1 Il sistema dei trasporti come lifelines

Con il termine “lifelines” (letteralmente “linee della vita”) vengono indicati quei sistemi di rete ai quali sono affidati i servizi indispensabili per la sopravvivenza delle attività umane. Le lifelines operano nei seguenti ambiti, secondo caratteristiche tecnico-funzionali proprie:

- Trasporti;
- Energia elettrica;
- Gas e combustibili liquidi;
- Acquedotti e fognature;
- Telecomunicazioni.

Vista la loro fondamentale importanza è necessario valutare il livello di rischio a cui sono esposte rispetto alle diverse tipologie di eventi che possono avvenire sul territorio in cui esse si sviluppano.

Il sistema dei trasporti rientra di diritto tra le lifelines (ed è probabilmente il più importante tra di esse) poiché assicura lo spostamento di persone e merci. In seguito ad eventi catastrofici un'interruzione del suo funzionamento impedirebbe di portare i soccorsi alla popolazione colpita o consentirne l'evacuazione.

È importante sottolineare che si potrebbe pensare di semplificare le analisi del rischio, escludendo alcuni sistemi di trasporto in ragione della loro apparente affidabilità. Le infrastrutture stradali e ferroviarie sono gli elementi sostitutivi delle reti stradali e ferroviarie e garantiscono il collegamento fisico tra le diverse zone del territorio, in ambito urbano (metropolitane e tramvie) ed extraurbano. Porti e aeroporti sono invece strutture puntuali nelle quali si svolgono le operazioni di imbarco e sbarco di passeggeri e merci, mentre il collegamento tra di esse non necessita di ulteriori infrastrutture. Per questo motivo il trasporto aereo e marittimo potrebbero sembrare poco interessati da eventi catastrofici. Tuttavia non si può notare come sia spesso più corretto adottare un approccio intermodale per descrivere compiutamente gli effetti degli eventi analizzati, considerando di volta in volta il ruolo dei sistemi di trasporto sul territorio e il tipo di evento considerato.

Un altro aspetto da non sottovalutare è inoltre l'integrazione tra le varie lifelines. Ad esempio tubazioni idriche, metanodotti, cavi elettrici e delle telecomunicazioni sono spesso inseriti all'interno della pavimentazione stradale, per ragioni di economicità e semplicità di installazione. A fronte dei numerosi vantaggi esistenti (la possibilità di sfruttare un tracciamento territoriale esistente e affittare ai vari enti gestori parti della sezione stradale), si ha lo svantaggio di non poter valutare gli effetti sulla singola lifeline trascurando le altre, poiché il danneggiamento di una di esse può ripercuotersi su tutte le altre.

2.1.2 I rischi sulle infrastrutture di trasporto

Lo studio dei rischi ai quali può essere esposta un'infrastruttura è uno strumento utile per garantire un adeguato livello di servizio sulla rete in diverse condizioni di esercizio. I rischi possono essere classificati in modo diverso a seconda degli attributi che si vanno a considerare.

Andando a considerare le cause, è possibile distinguere tra:

- eventi naturali, legati a fattori che non possono essere controllati (terremoti, alluvioni, frane, ecc.);
- eventi antropici, causati dall'attività umana (guasti a centrali nucleari o industrie chimiche).

In base alla probabilità di accadimento possiamo avere:

- eventi ordinari, come ad esempio l'allagamento di una strada;
- eventi eccezionali, come ad esempio alluvioni.

Ancora gli eventi possono essere:

- prevedibili, se, attraverso l'uso di tecnologie, è possibile prevedere l'evento, a volte con largo anticipo. Per questo tipo eventi è possibile realizzare *interventi attivi* di incremento del livello di sicurezza, agendo sulla mitigazione del rischio o scongiurandone del tutto le conseguenze (come avviene ad esempio nel caso di stabilizzazione dei versanti). Eventi prevedibili possono essere manifestazioni meteorologiche intense;
- imprevedibili, se l'evento è difficilmente prevedibile e di conseguenza non è possibile mettere in moto misure di soccorso con largo anticipo. In questo caso è possibile parlare di *interventi passivi* di incremento del livello di sicurezza, che agiscono riducendo la gravità dell'evento o le sue conseguenze (ad esempio la realizzazione di sistemi di previsione ed allerta, o l'elaborazione di modelli di gestione delle reti). Eventi imprevedibili sono i fenomeni legati al movimento della crosta terrestre o le eruzioni vulcaniche.

Tabella 1 riassume sinteticamente la classificazione dei rischi in una infrastruttura.

CLASSIFICAZIONE DEI RISCHI SULLE INFRASTRUTTURE		
Classificazione	Sottoclassificazione	Esempi
Causa	Evento naturale	Terremoti, frane alluvioni
	Evento antropico	Attività umane
Probabilità	Evento ordinario	Allagamento di una strada
	Evento eccezionale	Alluvione
Prevedibilità	Evento prevedibile	Piogge intense
	Evento imprevedibile	Terremoti, eruzioni vulcaniche

Tabella 1 Classificazione dei rischi sulle infrastrutture

Nel seguito del lavoro di tesi verrà considerato il caso di una rete stradale, adottando un approccio mono-modale relativamente al sistema di trasporto. L'importanza e l'estensione spaziale di questo tipo di rete nel territorio italiano giustificano tale scelta senza pregiudicare la rilevanza del lavoro.

2.1.3 *Equazione del rischio*

I concetti espressi in termini del tutto generali nei paragrafi precedenti possono essere rappresentati in forma compatta attraverso un'equazione che lega le componenti di base del rischio (*Equazione 1*).

Definita un'area di studio e un intervallo di tempo di riferimento, il rischio totale associato ad un evento calamitoso, può essere espresso come:

$$R = P \times V \times E$$

Equazione 1

Dove:

- (P) pericolosità: probabilità di accadimento dell'evento;
- (V) vulnerabilità: propensione a subire danneggiamenti in conseguenza dell'evento;
- (E) esposizione: numero degli elementi a rischio presenti nell'area (es: vite umane o edifici).

L'*Equazione 1* indica che il rischio è dato dalla combinazione della probabilità che l'evento considerato si verifichi e le conseguenze (danno) di tale evento, date dal prodotto tra vulnerabilità ed esposizione. Il rischio così definito può essere rappresentato attraverso una "curva di rischio" in un grafico Probabilità-Conseguenze (o Danno – Pericolosità) (*Figura 1*), che presenta un andamento di tipo iperbolico: ad eventi con alta probabilità di accadimento corrispondono conseguenze trascurabili, mentre ad eventi rari corrispondono conseguenze molto più gravi.

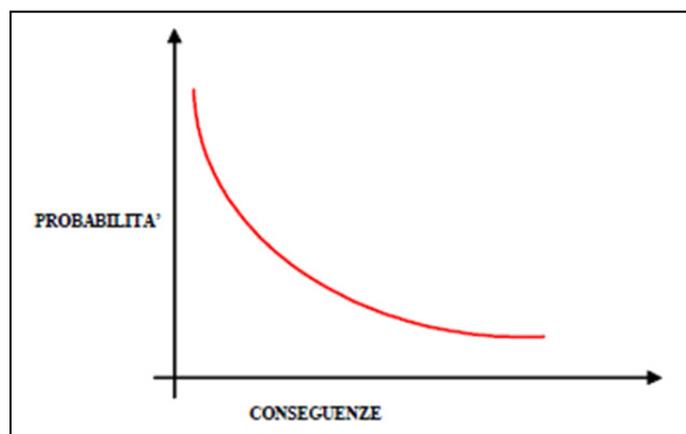


Figura 1 Curva di rischio

I diversi livelli di rischio associati alle combinazioni di pericolosità e conseguenze sono rappresentate nel grafico da una serie di iperboli, chiamate "curve di isorischio" (*Figura 2*).

La riduzione del rischio può avvenire muovendosi in orizzontale o in verticale all'interno del diagramma, ovvero agendo sul danno o sulla pericolosità. Una riduzione del danno può avvenire attraverso un intervento di tipo strutturale sul singolo bene, mentre la riduzione della pericolosità avviene attraverso un'adeguata attività di previsione. La combinazione di questi interventi rappresenta l'attività di mitigazione del rischio. È importante sottolineare che l'analisi di rischio deve essere svolta ogni volta in relazione al contesto nel quale si sta operando.

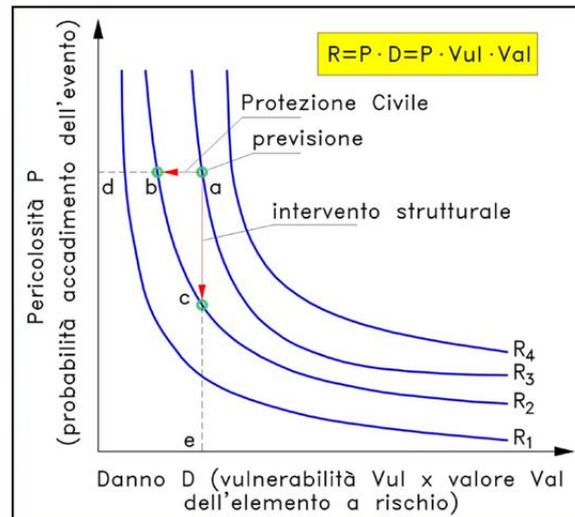


Figura 2 Curve di isorischio

Il rischio totale può essere di difficile quantificazione, quindi è più utile e semplice valutare il **rischio specifico**, ovvero la perdita attesa a seguito di un particolare fenomeno naturale, dato da:

$$R_s = P \times V$$

Equazione 2

È possibile esprimere anche il **danno potenziale**, ovvero la perdita potenziale subita nel caso in cui si verifichi l'evento, espresso da:

$$D = V \times E$$

Equazione 3

Applicando queste equazioni è possibile valutare il rischio per fasi successive, stimando singolarmente pericolosità, vulnerabilità ed esposizione e andando poi a sovrapporre i dati ottenuti, ad esempio attraverso l'impiego di strumenti GIS. Questo metodo consiste nel realizzare delle cartografie di sintesi e attraverso la loro sovrapposizione nell'ottenere classi di rischio per le infrastrutture stradali, stabilendone i metodi di gestione e il livello di accettabilità.

Tabella 2 mostra quali siano le componenti del rischio, gli strumenti che possono essere utilizzati per valutarle e gli elaborati finali che vengono prodotti nel processo di valutazione.

VALUTAZIONE DEL RISCHIO			
Componenti	Sottocomponenti	Strumenti	Elaborati finali
Pericolosità	Distinte in base alle tipologie di rischio cui è esposto il territorio	Dati storici	Carta della pericolosità
		Carte geologiche	
		Studi specifici	
		Monitoraggi	
Esposizione	Esposizione diretta	TGM	Carta dell'esposizione delle lifelines
		Flusso di traffico orario	
		Popolazione	
Vulnerabilità	Vulnerabilità funzionale Vulnerabilità strutturale	Manufatti	Carta della vulnerabilità delle lifelines
		Beni	
		Indicatori e indici di vulnerabilità	

Tabella 2 Valutazione finale del rischio

2.1.4 Valutazione della pericolosità

La pericolosità è una misura capace di valutare la probabilità che un determinato evento possa accadere. La valutazione della pericolosità può essere fatta per diversi tipi di evento (sisma, frane, inondazioni, valanghe, ecc.), utilizzando dati ed elaborazioni distinti per ciascuno di essi [3]. Ovviamente maggiori saranno i dati e maggiore sarà il livello di dettaglio e di affidabilità ottenuto dall'analisi, mentre la scala di rappresentazione delle carte sarà determinata in base all'ampiezza del territorio in esame e al grado di dettaglio richiesto.

La valutazione della pericolosità può essere fatta seguendo uno degli approcci qui riportati:

- Approccio di zona. Si identificano i rischi potenziali in una regione e si valutano gli effetti indotti sulla rete stradale, individuando i punti in cui la rete è soggetta ad un evento rischioso;

- Approccio locale. Si considera il singolo elemento della rete e si elencano tutti i possibili eventi a cui può essere soggetto.

Anche per la redazione delle carte di pericolosità sono possibili due approcci:

- Approccio probabilistico: si costruisce un modello fisico che rappresenta il fenomeno attraverso un certo numero di equazioni;
- Approccio deterministico: la pericolosità viene ricostruita attraverso i dati storici relativi agli eventi che si sono verificati nella zona in passato.

Tabella 3 schematizza brevemente quanto descritto.

VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ	
Tipologia di approccio	Definizione
Approccio di zona	Si identificano i rischi potenziali in una regione e si valutano gli effetti indotti sulla rete stradale, individuando i punti in cui la rete è soggetta ad un evento rischioso
Approccio locale	Si considera il singolo elemento della rete e si elencano tutti i possibili eventi a cui può essere soggetto
Approccio deterministico	Attraverso l'utilizzo di dati riguardanti gli eventi sismici che storicamente hanno interessato il sito è possibile stabilire la frequenza con cui si sono ripetuti nel tempo
Approccio probabilistico	La pericolosità è data dalla probabilità che in un certo intervallo di tempo si verifichi un evento con determinate caratteristiche

Tabella 3 Approcci per la valutazione della pericolosità

2.1.5 Valutazione dell'esposizione

L'esposizione valuta il numero di persone che possono rimanere coinvolte nell'evento (morti e feriti) e il numero di beni e manufatti danneggiati. Per *beni* si intendono tutte le risorse necessarie ai cittadini per svolgere le attività quotidiane (es. energia elettrica, acqua potabile); per *manufatti* si intendono genericamente tutte le opere realizzate dall'uomo, ovvero edifici, infrastrutture di trasporto e sistemi di condutture (gas, acqua, linea telefonica, ecc.). La distribuzione di questi elementi (beni, manufatti e popolazione) sul territorio non è uniforme: tanto più alta è la

concentrazione degli elementi a rischio in una zona, tanto maggiore è il livello di esposizione della stessa, ovvero la sua “sensibilità” al rischio considerato.

Nel caso delle infrastrutture viarie l’esposizione può essere definita seguendo due punti di vista diversi tra loro: diretto e indiretto.

Esposizione diretta

L’esposizione diretta analizza gli effetti diretti conseguenti al danneggiamento degli elementi strutturali, considerando le conseguenze per gli utenti che si trovano sull’infrastruttura stradale al momento dell’evento. Una misura di esposizione frequentemente utilizzata è il traffico giornaliero medio, che rappresenta le condizioni ordinarie di circolazione. Questo indicatore risulta maggiormente significativo in ambito urbano, ove i flussi sono elevati e il livello di congestione si mantiene elevato per periodi prolungati durante l’arco della giornata. Tuttavia è bene precisare che in condizioni di esercizio straordinarie (terremoti, alluvioni, ecc.) i flussi di traffico potrebbero essere sensibilmente diversi da quelli mediamente osservati.

In alternativa [3] è possibile individuare ossia il flusso veicolare orario. Sulla base dei valori massimi e minimi osservati vengono determinate diverse classi di esposizione in cui ripartire ogni elemento della rete.

Esposizione indiretta

L’esposizione indiretta si riferisce agli effetti sulla rete viaria che si manifestano successivamente all’evento. In base a questa definizione tutta la popolazione residente nel territorio risulta essere indirettamente esposta, in quanto potenzialmente soggetta all’inefficienza del sistema viario. L’esposizione indiretta ha un’importanza strategica nella pianificazione e gestione delle emergenze e per la valutazione del rischio soprattutto nelle infrastrutture viarie di tipo extraurbano, inoltre permette di valutare i danni che possono essere subiti da beni e manufatti. In *Tabella 4* sono sinteticamente riportate la definizione e l’ambito di applicazione delle due tipologie di esposizione presentate.

VALUTAZIONE DELL’ESPOSIZIONE

Tipologia di esposizione	Definizione	Applicazione
Diretta	Riguarda persone o bene direttamente colpiti dall’evento calamitoso	Valutata nell’infrastruttura

Indiretta	Riguarda le conseguenze dell'evento calamitoso	Valutata nell'intorno dell'infrastruttura
-----------	--	---

Tabella 4 Tipologie di esposizione al rischio

2.2 Valutazione della vulnerabilità

2.2.1 Definizioni di vulnerabilità

Il concetto di vulnerabilità non è univocamente definito nella letteratura specialistica, ma piuttosto espresso e conseguentemente valutato in modo diverso a seconda dei contesti applicativi (si veda *Tabella 5* Tipologie e relative definizioni di vulnerabilità). In via del tutto generale si può definire la vulnerabilità come il grado di perdita di funzionalità associato ad un elemento (o un insieme di elementi), ovvero la propensione di un elemento (o un insieme di elementi) a subire un danno, a seguito di un dato evento.

La vulnerabilità può essere quindi innanzitutto considerata da un punto di vista *funzionale*, intendendo i danni che derivano dalla mancata funzionalità di alcuni elementi del sistema.

Un altro aspetto da considerare per valutare la vulnerabilità globale è quello socioeconomico [4], ovvero le condizioni sociali, economiche e politiche che determinano le modalità e i tempi di ripresa e ricostruzione della zona. In contesti disagiati gli effetti vengono risentiti per lunghi periodi anche se l'intensità dell'evento non è stata molto elevata, al contrario in zone in cui la situazione economica e sociale è ben sviluppata gli effetti sono sanabili in tempi brevi. Per quanto descritto si parla di vulnerabilità *socioeconomica*.

Altri autori [5] differenziano la vulnerabilità in *intrinseca* ed *estrinseca*: la prima fa riferimento ad elementi che costituiscono l'infrastruttura, mentre la seconda fa riferimento ad elementi che non fanno parte del solido stradale, ma il cui collasso comporterebbe un danneggiamento anche alla strada stessa. Entrambe fanno parte della vulnerabilità *fisica* (o *strutturale*), perché riferite alle caratteristiche strutturali del solido stradale e dei manufatti ad esso prospicienti.

Cutter e altri [4] distinguono i concetti di vulnerabilità *biofisica* e *sociale*. Con vulnerabilità biofisica si intende l'identificazione dei possibili rischi, dell'intensità e della frequenza di un dato evento (pericolosità); con vulnerabilità sociale l'insieme di attività e circostanze che vanno a definire il tessuto sociale di una regione e le sue trasformazioni. Questo secondo concetto è simile a quello socioeconomico espresso precedentemente e può essere valutato prendendo in considerazione diversi fattori, tra cui:

- Impossibilità di utilizzare delle risorse, incluse l'informazione e le conoscenze;
- Accesso limitato alla rappresentazione e al potere politico;
- Costumi e credenze;
- Caratteristiche dell'edificato;
- Benessere economico e sociale;
- Caratteristiche delle infrastrutture e delle lifelines.

In passato si è pensato di far coincidere la vulnerabilità globale di un sistema con la sommatoria delle vulnerabilità dei singoli elementi che lo costituiscono. Tuttavia quest'approccio è assolutamente insufficiente a descrivere il problema, poiché non si tengono in considerazione le interazioni che si vengono a determinare tra gli elementi del sistema. Per questi motivi è opinione condivisa che la vulnerabilità globale dipende sia dalla vulnerabilità dei singoli elementi sia da quelle dalle interrelazioni che avvengono tra di esse.

TIPOLOGIE DI VULNERABILITÀ

Tipologie	Definizione	Fonte
Vulnerabilità diretta	Propensione di un elemento, o di un gruppo di elementi, a subire un danno più o meno grave (fino al crollo) a seguito di una scossa	Cafiso e altri [6]
Vulnerabilità indotta	Effetti che vengono prodotti sul territorio a causa del collasso di uno più elementi esterni al sistema	Cafiso e altri [6]
Vulnerabilità differita	Effetti che si manifestano successivamente al sisma	Cafiso e altri [6]
Vulnerabilità funzionale	Grado di perdita di funzionalità associato ad un elemento, o ad un insieme di elementi, a seguito di evento sismico di una data intensità	Cafiso e altri [6]
Vulnerabilità socioeconomica	Condizioni sociali, economiche e politiche che determinano le modalità	Cutter e altri [4]

	e i tempi di ripresa e ricostruzione della zona	
Vulnerabilità intrinseca	Si riferisce a valori caratteristici degli elementi che costituiscono l'infrastruttura	Tesoriere e al. [5]
Vulnerabilità estrinseca	Si riferisce ad elementi che non fanno parte del solido stradale, ma il cui collasso comporterebbe un danneggiamento anche alla strada stessa	Tesoriere e al. [5]
Vulnerabilità biofisica	Identificazione dei possibili rischi, dell'intensità e della frequenza di un sisma	Cutter e altri [4]
Vulnerabilità sociale	Insieme di attività e circostanze che vanno a definire il tessuto sociale di una regione e le sue trasformazioni (simile alla vulnerabilità socioeconomica)	Cutter e altri [4]

Tabella 5 Tipologie e relative definizioni di vulnerabilità

2.2.1.1 Definizione di vulnerabilità di una rete stradale

Similmente a quanto presentato per il concetto generale di vulnerabilità, non esiste in letteratura una definizione univoca di vulnerabilità di una rete stradale.

Husdal [7] individua tre tipologie di vulnerabilità di una rete stradale, dalla cui composizione si determina la vulnerabilità globale:

- Strutturale, riferita alle caratteristiche costruttive della strada, come ad esempio la geometria dell'infrastruttura e delle opere d'arte ad essa collegate;
- Naturale, riferita alle caratteristiche del territorio attraversato dalla strada;
- Relativa/generata dal traffico; riferita al flusso di traffico che interessa l'infrastruttura e alle sue variazioni in particolari situazioni (orari di punta, operazioni di manutenzione, giorni particolari, ecc.).

Secondo l'autore il concetto di vulnerabilità deve identificare tre aspetti: il tipo di rischio rispetto al quale la rete è vulnerabile, gli elementi più vulnerabili e le modalità con cui si manifesta la vulnerabilità. Da sottolineare è la differenziazione che viene fatta tra vulnerabilità e affidabilità della rete, infatti la prima è legata al malfunzionamento e al collasso di un elemento, mentre la seconda attiene solo al suo funzionamento.

Non tutti però considerano una distinzione così netta tra i due concetti, infatti secondo **Berdica** [8], l'*affidabilità* è un concetto che consente di valutare la vulnerabilità della rete. La vulnerabilità è definita come la *suscettibilità* di una rete agli incidenti, dove per incidente si intende una riduzione della "serviceability", ossia della possibilità di usare una rete di trasporto durante un dato periodo. In altri termini la vulnerabilità non riguarda la sicurezza di una rete stradale, ma la riduzione di accessibilità dovuta all'evento, dove per accessibilità si intende la possibilità da parte dei cittadini di prendere parte alle attività che si svolgono nel territorio grazie ai sistemi di trasporto (Jones, 1981).

L'affidabilità diviene una misura di vulnerabilità in quanto si possono distinguere tre diverse tipologie che possono rappresentare delle misure di vulnerabilità, esse sono:

- Connettività, valuta la probabilità che tutti gli utenti della rete possano raggiungere la loro destinazione;
- Tempo di viaggio, probabilità di poter raggiungere la propria destinazione in dato periodo di tempo;
- Capacità, probabilità che la rete possa far defluire una certa quantità di traffico.

Altri concetti che vengono ricondotti dall'autrice alla vulnerabilità sono la *resilienza*, ovvero la capacità di un sistema di giungere ad un nuovo stato di equilibrio dopo aver avuto una perturbazione, la *ridondanza*, ossia la duplicazione i componenti all'interno della rete che possono continuare a lavorare nel caso che una parte della rete non sia operativa e la *robustezza* cioè la capacità del sistema di compensare le deformazioni.

Altri autori (**Bleukx, A. Stada, J.E. Immers**) [9], legano il concetto di vulnerabilità alla *configurazione della rete* arrivando ad individuare quale sia lo schema più vulnerabile in particolari condizioni di traffico o di interruzione della rete.

L'associazione tra il concetto di vulnerabilità e quello di *accessibilità*, intesa come la connessione tra un'origine e una destinazione o l'accesso a diverse zone della rete, è stata avanzata anche da **Taylor e d'Este** [10] con riferimento alla vulnerabilità di un nodo: un nodo diventa vulnerabile se i

danni ad alcuni archi diminuiscono l'accessibilità al nodo stesso. In questo modo la vulnerabilità viene definita in termini di qualità di accesso alla rete partendo da un nodo contenuto in essa. Come Husdal, gli autori inoltre distinguono tra vulnerabilità ed affidabilità: il primo concetto viene legato alle conseguenze dell'evento ed il secondo alla probabilità che un evento possa accadere.

Infine **Jenelius ed altri** [11] considerano la vulnerabilità come *criticità* degli elementi della rete: tale criticità viene stabilita in base all'importanza dell'elemento e alla probabilità che esso ha di danneggiarsi. Quando queste due caratteristiche sono elevate l'elemento risulta essere critico.

In *Tabella 6* è riportata una sintesi delle definizioni proposte in letteratura.

VULNERABILITÀ DI UNA RETE STRADALE			
Autore	Concetti analizzati	Definizione	Note
Husdal	Tre tipologie di vulnerabilità	Strutturale, caratteristiche fisiche della strada;	Differenziazione tra vulnerabilità e affidabilità della rete
		Naturale, caratteristiche del territorio attraversato dalla strada; Relativa/generata dal traffico, flusso di traffico che interessa un'infrastruttura sue variazioni.	
Berdica	Affidabilità Resilienza Ridondanza Robustezza	La vulnerabilità è definita come la suscettibilità di una rete agli incidenti, dove per incidente si intende una riduzione della "serviceability", ossia della possibilità di usare una rete di trasporto durante un dato periodo.	L'affidabilità è un concetto che consente di valutare la vulnerabilità della rete attraverso tre misure (connettività, tempo di viaggio e capacità)
Bleukx, A. Stada, J.E. Immers	Configurazione della rete	La vulnerabilità viene associata alla configurazione della rete	Individuano quale sia lo schema più vulnerabile in particolari condizioni di traffico o di interruzione della rete
Taylor e d'Este	Accessibilità Affidabilità	Definiscono l'accessibilità come la connessione tra un'origine e una destinazione o l'accesso a diverse zone	Considerano la vulnerabilità di nodo, definita in termini di

		della rete	qualità di accesso alla rete; inoltre fanno una differenziazione tra vulnerabilità e affidabilità
Jenelius ed altri	Criticità	Definiscono la vulnerabilità in rapporto alla criticità degli elementi della rete	La criticità viene stabilita in base all'importanza dell'elemento e alla sua probabilità di danneggiarsi

Tabella 6 Definizione della vulnerabilità secondo alcuni autori

3 STUDIO DELLA VULNERABILITA' SISMICA IN UNA INFRASTRUTTURA STRADALE

Dopo aver dato le varie definizioni di vulnerabilità di una rete stradale, è opportuno entrare più nello specifico analizzando la vulnerabilità sismica delle infrastrutture stradali. Nel capitolo vengono presentate alcune definizioni riguardanti le componenti del rischio e alcune indicazioni più specifiche riguardanti la valutazione della vulnerabilità sismica.

3.1 Il rischio sismico e le sue componenti

Il **rischio sismico** può essere definito come [2] “*la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti)*”.

La pericolosità sismica è collegata alla frequenza e all'intensità dei terremoti che interessano un dato territorio. In passato si era soliti valutare il rischio sismico in ragione dell'estensione e della gravità dei danni previsti a seguito di un evento sismico, espressi in termini di vite umane (morti e feriti) o di stime economiche dei danni attesi. Più recentemente si è sviluppato l'approccio di valutare la perdita complessiva o parziale delle capacità funzionali di un sistema antropico territoriale in seguito al danneggiamento di alcuni elementi.

In base al metodo di elaborazione e di correlazione dei fattori si possono avere diverse definizioni di rischio sismico:

- Rischio sismico assoluto, la stima viene fatta attraverso una stima assoluta dei danni provocati dall'evento sismico (in termini probabilistici) espressi dal numero di morti, edifici danneggiati, ecc;
- Rischio sismico relativo, introdotto per superare i limiti riscontrati nella precedente metodologia, in questo caso non esistono indicatori numerici del rischio ma si effettua un confronto tra le varie aree in cui è stato suddiviso il territorio;
- Rischio accettabile, vista l'impossibilità di ridurre a zero il rischio sismico è bene che le pubbliche amministrazioni elaborino un programma strategico di miglioramento anti-sismico individuando quelli che possono essere considerati rischi “accettabili”. È importante che

rischi accettabili più bassi vengano assegnati alle strutture più importanti in condizioni di emergenza, come ad esempio gli ospedali.

Indipendentemente dalle differenze riscontrate nelle diverse metodologie, la finalità della valutazione del rischio sismico è quella di determinarne gli effetti, siano essi diretti o indotti.

Con *effetti diretti* si indicano tutti quegli effetti immediatamente derivanti dall'evento sismico come ad esempio crolli, danneggiamenti a strutture, ecc.

Gli *effetti indotti* sono quelli non prodotti direttamente dal sisma ma per questo non meno importanti; rientrano in questa categoria il crollo di un edificio su di un altro, incendi provocati dalla rottura di condutture del gas, danni sulle linee elettriche, ecc.

La valutazione del rischio sismico inizia con lo studio della **pericolosità** della zona di studio.

Secondo quanto indicato dalla protezione civile [2], *“la pericolosità sismica di un territorio è rappresentata dalla frequenza e dalla forza dei terremoti che lo interessano, ovvero dalla sua sismicità e viene definita come la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi la soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (Pga) di nostro interesse.”*

Per determinare la pericolosità sismica di un'area, ovvero la possibile localizzazione degli eventi, le loro caratteristiche e le possibili conseguenze, la Protezione Civile [2] propone due tipologie di approcci: deterministico o probabilistico. Il primo metodo necessita dei dati riguardanti gli eventi sismici che storicamente hanno interessato il sito, in modo da poter stabilire la frequenza con cui si sono ripetuti nel tempo, mentre il secondo approccio stima la probabilità che in un certo intervallo di tempo si verifichi un evento con determinate caratteristiche.

Il termine **esposizione** sismica [6] indica “l'estensione, la quantità, la qualità dei diversi sistemi antropici che compongono la realtà territoriale (popolazione insediata, edifici, sistemi di infrastrutture, ecc.) le cui condizione e/o il cui funzionamento possono essere danneggiati, alterati o distrutti da un evento sismico”.

In Italia un aspetto rilevante dell'esposizione è dato dall'inesestimabile patrimonio culturale presente nei centri storici delle città. Per questo motivo, per la prevenzione e mitigazione del rischio sismico, è stato avviato un censimento su scala nazionale dei centri storici esposti al rischio e lo sviluppo di un metodo di indagine conoscitiva sulla vulnerabilità dell'edificato storico.

Come per tutti gli altri tipi di vulnerabilità, l'obiettivo primario risulta essere la salvaguardia della vita umana. Nel caso di rischio sismico la perdita di vite umane può essere dovuta oltre che al crollo di edifici, ponti o altre strutture, a incidenti stradali dovuti ad altri meccanismi che si sviluppano durante un terremoto, tra cui frane, liquefazione dei terreni, maremoti e incendi. Per questo tipo di analisi [2] occorre valutare:

- l'orario e il periodo dell'anno in cui avviene il terremoto;
- il numero delle persone presenti negli edifici al momento del sisma;
- le possibilità di fuggire e/o di proteggersi;
- il tipo di coinvolgimento delle persone (morte o ferite subite);

La stima delle conseguenze di un terremoto in termini di vite umane può risultare molto complicata in base al momento del giorno e dell'anno in cui viene fatta. E' possibile considerare due punti di vista per lo svolgimento di quest'analisi: quello "statico", che fa riferimento agli insediamenti presenti sul territorio oggetto di studio, oppure "dinamico", valutando le attività socio-economiche dall'area. Prendendo in considerazione questo secondo approccio, occorre specificare a quale momento della giornata si fa riferimento, in quanto durante le ore centrali del giorno la popolazione sarà concentrata nelle zone produttive, amministrative e commerciali dell'area, mentre nelle ore notturne ci sarà una maggiore densità in quelle residenziali. Un altro aspetto da non trascurare, specie in contesti particolari come le zone turistiche, è quello delle variazioni stagionali della popolazione presente nell'area.

Infine occorre considerare la **vulnerabilità** sismica, la quale può essere associata non solo a beni e manufatti ma anche alle persone [6] ed è una caratteristica intrinseca di ciascun elemento. Secondo quanto riportato dalla protezione civile [2], *"la vulnerabilità è la propensione di una struttura a subire un danno di determinato livello a seguito di un evento sismico di una data intensità"*.

Lo studio di Cafiso e altri [6] individua tre componenti di vulnerabilità (diretta, indotta e differita), da applicare in modo differenziato a seconda dell'oggetto in analisi:

- per vulnerabilità diretta si intende la propensione di un elemento, o di un gruppo di elementi, a subire un danno più o meno grave (fino al crollo) a seguito di una scossa;
- per vulnerabilità indotta si intendono gli effetti che vengono prodotti sul territorio a causa del collasso di uno più elementi;

- per vulnerabilità differita si intendono tutti gli effetti che si manifestano successivamente al sisma.

3.1.1 Vulnerabilità sismica e modelli di trasporto

È utile anzitutto richiamare alcuni concetti della pianificazione dei trasporti che sono alla base della definizione dei modelli di trasporto utilizzati nel seguito.

Lo studio della mobilità, intesa come il trasporto di persone e/o merci, può essere fatto mediante approccio sistemico simulando l'interazione tra il sottosistema della domanda ed il sottosistema dell'offerta mediante modelli matematici. Il processo di simulazione si articola in tre operazioni principali: analisi della domanda di trasporto, rappresentazione dell'offerta e interazione tra domanda e offerta con modelli di assegnazione (*Figura 3*).



Figura 3 Schema riassuntivo per la modellazione di una rete stradale

Per quanto riguarda la **domanda** di trasporto, essa rappresenta il bisogno derivato dalla necessità degli utenti di consumare beni e servizi in luoghi diversi da quello in cui si trovano e pertanto dipende dalle variabili socio-economiche dell'area e dalle caratteristiche dell'offerta di trasporto.

Definito il confine spaziale del sistema di analisi, si individuano al suo interno le zone di traffico, ovvero le porzioni di territorio dalle quali si suppone che abbiano origine e destinazione gli spostamenti che compongono la domanda. Nella procedura di zonizzazione è necessario definire il livello di dettaglio che avranno i modelli di offerta e domanda poi sviluppati, garantendo la coerenza tra i due.

La rappresentazione degli spostamenti effettuati dagli utenti del sistema di trasporto così definito, avviene attraverso una matrice chiamata “matrice di interscambio” o “matrice origine-destinazione”

M_{OD} , in cui il generico elemento di $M_{OD}(i, j)$, ($i, j = 1, \dots, N_z$) rappresenta il numero di spostamenti effettuati dalla i -esima zona di origine alla j -esima zona di destinazione.

Conoscendo il valore di tutte le celle della matrice si è in grado di stabilire il potenziale che una determinata zona ha di attrarre spostamenti e di generarne verso altre zone. Questo potenziale è esprimibile con la somma rispettivamente di colonna e di riga. Gli elementi diagonali di una matrice OD rappresentano gli spostamenti intrazonali, ovvero quegli spostamenti che si generano e terminano internamente ad ogni singola zona.

Se la struttura della matrice prevede la numerazione dei centroidi zionali ordinata in ordine crescente dall'interno verso l'esterno, la matrice può essere suddivisa intuitivamente in quattro sottomatrici rappresentanti gli spostamenti tra le zone interne all'area di studio (I-I), gli spostamenti di scambio interno-esterno (I-E) ed esterno-interno (E-I), e gli scambi tra centroidi esterni all'area di studio (E-E). *Figura 4* rappresenta quanto appena detto.

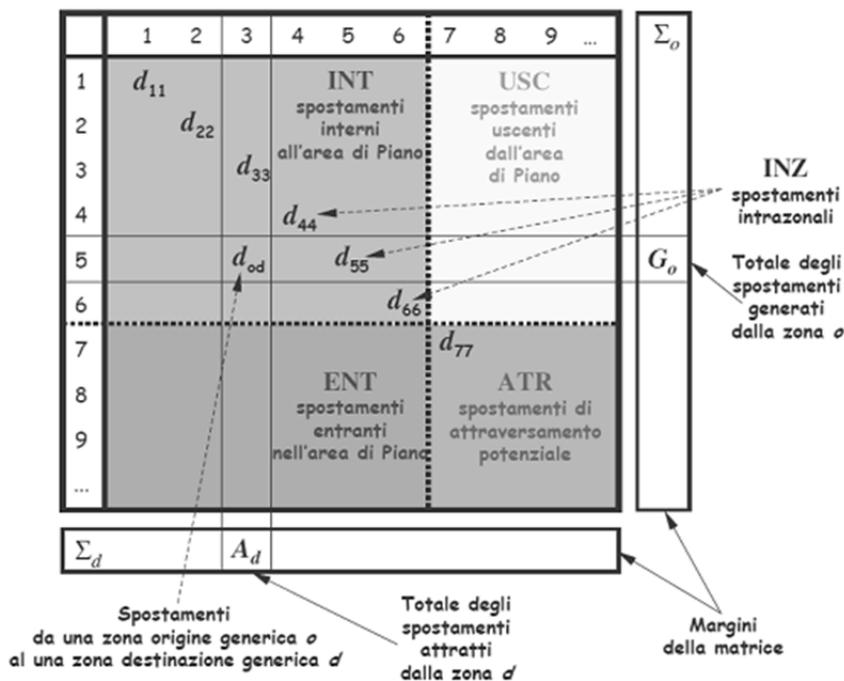


Figura 4 Struttura di una matrice origine-destinazione

L'**offerta** di trasporto si compone di due parti essenziali individuate attraverso la componente fisica, rappresentata mediante un grafo di rete, e la componente funzionale, rappresentata invece da funzioni di costo che legano i costi di percorrenza con i flussi transitanti nel generico elemento.

Il grafo di rete è formato da due insiemi:

- l'insieme dei nodi, rappresentanti punti particolari della rete (quali intersezioni) o punti in cui si ha una variazione di una o più caratteristiche fisiche e/o funzionali di un'infrastruttura (ad esempio una variazione dei limiti di velocità), o ancora punti iniziali e finali di un fenomeno di attesa;
- l'insieme degli archi (link), rappresentanti il collegamento tra una coppia di nodi, individuano tronchi infrastrutturali, oppure una linea di trasporto collettivo o accessi alla stessa o ancora fenomeni di attesa.

Nell'insieme dei nodi è importante distinguere i nodi fisici dai cosiddetti nodi centroidi, ovvero quei nodi fittizi ai quali si fanno corrispondere l'arrivo e la partenza degli spostamenti da e verso una determinata zona. Allo stesso modo nell'insieme degli archi si individuano gli archi connettori, ovvero elementi fittizi che realizzano il collegamento tra i nodi centroidi e i nodi fisici della rete.

Per quanto concerne la componente funzionale di un modello di offerta di trasporto, questa è formata dall'insieme delle funzioni di costo che legano flussi e costi d'uso sostenuti dall'utente. Queste funzioni, a seconda che le variabili di costo dipendano dal flusso del singolo arco o anche da quello presente su altri archi, si distinguono rispettivamente in funzioni di costo separabili o funzioni di costo non separabili. Nei modelli sono generalmente usate funzioni di costo separabili in quanto garantiscono l'unicità delle soluzioni.

Spesso, per lo meno in ambito urbano, si è soliti associare al costo d'uso d'arco una funzione di tempo di percorrenza; tale variabile è formata da due componenti, il tempo di movimento effettivo e il tempo di ritardo.

Per rappresentare il tempo di percorrenza si ricorre a curve di deflusso che individuano il legame tra il flusso e la velocità media del deflusso e, tra queste, quelle maggiormente utilizzate, in quanto ben rappresentanti il livello di congestione degli archi, sono le curve BPR, di origine sperimentale. Le funzioni da usare per determinare i tempi di ritardo alle intersezioni sono invece dipendenti dal tipo di controllo presente alle medesime.

I **modelli di assegnazione della domanda** ad una rete di trasporto simulano l'interazione domanda-offerta e consentono di determinare le caratteristiche del deflusso (ovvero degli adeguati indicatori di **prestazione**, quali i flussi di traffico sugli archi del modello di offerta, i livelli di congestione, i tempi di percorrenza,..) in funzione del modello di scelta di percorso utilizzato, della tipologia delle funzioni di costo, della tipologia di utenti e della dinamica periodale. In funzione di queste caratteristiche si possono definire diversi modelli di assegnazione (*Tabella 7*).

Rete		Scelta del percorso	
		Deterministica	Stocastica
Non congestionata		DNL (carico deterministico della rete)	SNL (carico stocastico della rete)
Congestionata	Equilibrio	DUE (equilibrio deterministico)	SUE (equilibrio stocastico)
	Processo dinamico	DDP (processo dinamico deterministico)	SDP (processo dinamico stocastico)

Tabella 7 Classificazione dei modelli di assegnazione

La prima distinzione riguarda le ipotesi riguardanti il modello di scelta del percorso; se si ipotizza che gli utenti siano perfettamente informati si può affermare che i costi percepiti e oggettivi corrispondono e la scelta di percorso sarà quindi deterministica. Nel caso in cui si assuma che gli utenti non abbiano una perfetta conoscenza dei costi d'uso, la scelta di percorso è di tipo stocastico poiché costi percepiti e costi oggettivi si differenziano di un termine dovuto all'errore di percezione.

La seconda distinzione è fatta sulle ipotesi legate alle funzioni di costo; l'ipotesi di reti non congestionate corrisponde a funzioni di costo indipendenti dai flussi (quindi con costi di percorrenza fissi). Nell'ipotesi di reti congestionate, i costi sono invece dipendenti dai flussi di traffico sugli archi. L'assegnazione a rete non congestionata può essere usata come punto di partenza per analizzare reti congestionate, ad esempio per stimare le probabilità di scelta del percorso. Per il caso a reti congestionate si può ulteriormente differenziare l'assegnazione a seconda che si ammetta che il sistema raggiunga una configurazione di equilibrio, oppure che per cause intrinseche al sistema stesso possa trovarsi nel tempo in diversi stati possibili.

Lo schema di *Figura 3* è valido anche nel caso di un evento sismico che interessi l'area di studio, tuttavia l'analisi deve opportunamente considerare le variazioni nel tempo della domanda di mobilità e dell'offerta di trasporto, in funzione del danno fisico provocato dal sisma, degli elementi a rischio e delle politiche di intervento post-sisma [12].

Nel caso di eventi sismici la **domanda** varia considerevolmente in rapporto all'orizzonte temporale considerato nell'analisi, distinguendo tra breve e lungo termine.

Nelle ore immediatamente successive a un terremoto, la rete è interessata da due componenti di traffico: flussi di evacuazione dalla zona colpita e flussi generati dalle unità di soccorso. Nel primo caso si tratta degli spostamenti della popolazione colpita, che cercherà di abbandonare le proprie abitazioni per raggiungere i luoghi di ricovero indicati. Entità e distribuzione spaziale degli spostamenti all'interno dell'area di studio sono fortemente influenzati dal momento della giornata in cui avviene il sisma (notte vs. giorno) e da eventuali effetti legati alla stagionalità (estate vs. inverno). La seconda componente si riferisce ai flussi dei veicoli di emergenza (es. vigili del fuoco, ambulanze, protezione civile) operativi nell'area colpita. In alcuni casi i piani di evacuazione prevedono che i mezzi di soccorso siano gli unici veicoli autorizzati a muoversi lungo le strade, mentre le persone evacuate sono costrette a muoversi a piedi.

Una volta terminate le procedure di evacuazione dei civili colpiti del sisma, la domanda di trasporto si modifica in relazione al danneggiamento subito dal patrimonio edilizio. L'inutilizzabilità di alcuni edifici (abitazioni, scuole, luoghi di lavoro), e il loro progressivo ripristino nel tempo, determina una continua riconfigurazione della domanda di trasporto, dipendente dal complesso processo di riabilitazione dell'intera area di studio colpita.

Per quanto riguarda l'**offerta** di trasporto, è necessario valutare il comportamento di ciascun elemento del sistema (vulnerabilità diretta o intrinseca) e di quegli elementi esterni al sistema di trasporto aventi diretta influenza sul sistema stesso (vulnerabilità indiretta o estrinseca). Nel caso delle reti stradali risultano di particolare interesse gli elementi maggiormente vulnerabili nel caso di evento sismico (ponti e viadotti) e le strutture "diffuse" affacciate sulle infrastrutture viarie (edifici). Come per la domanda di mobilità anche l'offerta di trasporto dipende fortemente dall'orizzonte temporale considerato e si modifica in ragione degli interventi di riabilitazione progressivamente messi in opera.

Ponti e viadotti sono i componenti di maggior rilievo per lo studio della vulnerabilità delle reti stradali (in termini di esposizione diretta). La chiusura di un ponte provoca generalmente ingenti ripercussioni sulla circolazione e sulla connettività della rete, fino all'impossibilità di soddisfare, almeno temporaneamente, parte della domanda di mobilità. Questo fatto è amplificato nel caso in cui l'infrastruttura sia a servizio della rete stradale e della rete ferroviaria, a causa della mancanza di sostituibilità tra i due modi di trasporti.

Per quanto riguarda le strutture diffuse (edifici affacciati sulla strada) il danno sismico è funzione della struttura dell'edificio, dell'età, dei materiali, della vicinanza ad altre costruzioni, e ovviamente dell'intensità e della durata del terremoto. Durante il sisma la struttura inizia ad oscillare e, nel caso

essa non sia sufficientemente duttile, può avvenire il crollo dell'edificio o di una sua parte (calcinacci). Da un punto di vista funzionale gli archi interessati riducono notevolmente la propria capacità in seguito al crollo degli edifici, fino a determinare in alcuni casi il blocco completo delle attività di soccorso (*Figura 5 Figura 6*). Nella successiva fase di ripristino, anche di lunga durata, gli interventi sugli edifici danneggiati possono rappresentare un impedimento rilevante per la riabilitazione completa della rete e della propria funzionalità.



Figura 5 Strada parzialmente bloccata durante il sisma di Modena (maggio 2012)



Figura 6 Strada resa completamente inutilizzabile dal sisma dell'Aquila (aprile 2009)

Ulteriori approfondimenti a proposito della domanda di viaggio e della riduzione della funzionalità degli archi stradali verranno fatti nei capitoli §4 e al §5. Per quanto riguarda le prestazioni del sistema, le metodologie comunemente adottate per la valutazione della vulnerabilità vengono invece presentate nel paragrafo che segue.

3.2 *Metodologie per la valutazione della vulnerabilità*

Il bisogno di progettare infrastrutture di trasporto che siano in grado di resistere in caso di eventi critici come terremoti, alluvioni, frane ecc., ha comportato negli ultimi vent'anni un incremento degli studi riguardanti le prestazioni di una rete. Nel caso si consideri eventi sismici, Chang [13] individua tre tipologie di indicatori che consentono di fare queste analisi, basati su:

- Perditempo e costo di viaggio;
- Capacità di rete;
- Connettività.

La prima tipologia include indicatori dipendenti dalla domanda di spostamento tra le varie origini e destinazioni e riflette le caratteristiche socio-economiche di una certa area di studio (numero e reddito delle famiglie, distribuzione e tipologia delle attività,..). Le altre tipologie di indicatori dipendono soltanto da caratteristiche intrinseche della rete (geometria e topologia).

Di seguito verrà fatta una descrizione più approfondita di ciascuna tipologia, indicando gli indicatori più importanti e le relative metodologie di calcolo.

3.2.1 *Perditempo e costi di viaggio*

Il costo (generalizzato) di viaggio sostenuto dall'utente è un indicatore ampiamente utilizzato nella valutazione del rischio sismico nelle reti di trasporto. Esso è inteso come la misura della disutilità complessiva legata allo spostamento (tempo di viaggio, costo di trasporto, comfort, ..), anche se è solitamente inteso come perditempo associato allo spostamento. I costi di viaggio possono essere stimati attraverso i modelli di interazione domanda/offerta presentati nel §5, e per loro natura dipendono dalle caratteristiche della domanda e lo stato della rete (pre o post-sisma). L'informazione associata a questo indicatore viene combinata in diversi modi per la determinazione di indicatori di vulnerabilità.

JENELIUS

Erik Jenelius lega il concetto di vulnerabilità a quello di *criticità* dei diversi elementi che compongono la rete, come combinazione della debolezza e dell'importanza di ciascuno di essi all'interno del sistema. Gli indicatori proposti possono essere applicati sia a livello di arco che di

rete, fornendo un'indicazione delle prestazioni degli archi o della rete nello scenario pre-sisma e post-sisma.

L'approccio proposto [14] [15] si basa sull'ipotesi di escludere alcuni archi della rete (per effetto del danneggiamento subito) e valutare la variazione di accessibilità prodotta rispetto allo stato precedente alla chiusura. L'*importanza* degli archi all'interno della rete viene valutata sulla base dell'incremento complessivo del tempo di viaggio a seguito della chiusura dell'arco, mentre l'*esposizione* dei nodi (centroidi) sulla base dell'incremento del tempo di viaggio a causa della chiusura degli stessi.

Le misure di vulnerabilità per gli archi, e quindi l'importanza degli stessi all'interno della rete, vengono dedotte utilizzando la seguente equazione:

$$\Delta c_{ij}^{(e)} = c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)}$$

Equazione 4

dove

- Δc_{ij} rappresenta la differenza di costo di viaggio tra le zone i e j con e senza interruzione dell'arco;
- $c_{ij}^{(e)}$ è il costo di viaggio tra le zone i e j con interruzione dell'arco;
- $c_{ij}^{(0)}$ è il costo di viaggio tra le zone i e j senza interruzione dell'arco.

La chiusura dell'arco può provocare una separazione della rete in due parti distinte (cut links) o meno (no cut links); in base a questa distinzione l'importanza viene valutata in modo differente.

Nel caso in cui non vi sia separazione in due parti (no cut links), l'importanza viene valutata con l'*Equazione 5*:

$$IMPORTANCE_{net}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{i \neq j} w_{ij}}, k \in E^{nc}$$

Equazione 5

dove:

- k è l'arco di cui si sta valutando l'importanza;

- $c_{ij}^{(k)}$ costo di viaggio tra le zone i e j quando l'arco k è interrotto;
- $c_{ij}^{(0)}$ costo di viaggio tra le zone i e j nel caso di completo funzionamento (0) della rete;
- w_{ij} è un peso attribuito alla relazione tra le zone i e j , che riflette l'importanza della stessa all'interno della rete. Ad esempio, il peso può essere lo stesso per tutte le relazioni (uguale importanza di tutte le relazioni), oppure proporzionale alla domanda di spostamento (le relazioni più importanti sono quelle con maggiore domanda);
- E^{nc} rappresenta l'insieme dagli archi che non determinano una separazione della rete.

Nel caso in cui vi sia separazione in due parti (cut links) si fa riferimento alla domanda insoddisfatta, e l'importanza viene valutata con l'Equazione 6:

$$IMPORTANCE_{net}^{uns} K = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^{(e)}}{\sum_i \sum_{i \neq j} x_{ij}}, k \in E$$

Equazione 6

con:

$$u_{ij}^e = \begin{cases} x_{ij} & c_{ij}^e = \infty \\ 0 & c_{ij}^e < \infty \end{cases} \text{ se}$$

Equazione 7

Dove:

- u_{ij}^e è la domanda dalla zona i alla zona j non soddisfatta;
- x_{ij} è la domanda di trasporto dalla zona i alla zona j .

Dall'Equazione 7 si osserva che, con riferimento ad una specifica relazione O-D, la domanda insoddisfatta risulta pari alla domanda di trasporto quando il costo di viaggio risulta infinito, ovvero non esistono percorsi in grado di collegare origine e destinazione.

Come anticipato, Jenelius definisce anche una misura di esposizione in relazione ad un centroide o ad un gruppo di centroidi. L'esposizione viene data dall'Equazione 8:

$$EXPOSURE_{rand}(m) = \frac{\sum_{k \in E^{nc}} \sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{L^{nc} \sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}}$$

Equazione 8

Dove:

- m è un'insieme di nodi per i quali si calcola l'esposizione;
- L^{nc} è il numero di collegamenti che non determinano una separazione della rete.
- E^{nc} è l'insieme dagli archi che non determinano una separazione della rete;
- V_m^d è l'insieme dei centroidi all'interno della municipalità m che generano domanda;
- w_{ij} sono i pesi attribuibili per valutare l'importanza dei singoli centroidi della rete;
- $c_{ij}^{(k)}$ è il costo di viaggio tra due centroidi i e j , nel caso di rete danneggiata;
- $c_{ij}^{(0)}$ è il costo tra due centroidi i e j nella situazione di perfetto funzionamento della rete.

Nel caso peggiore, ossia quando si ha chiusura dell'arco più importante della rete, l'esposizione viene calcolata con l'Equazione 9 sottostante:

$$EXPOSURE_{max}(m) = \max_{k \in E^{nc}} \frac{\sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}}$$

Equazione 9

In uno studio successivo [16] l'autore considera ogni arco separatamente, invece di assumere uno scenario medio. Anche in questo caso vengono utilizzati due indicatori che si basano sull'incremento del tempo di viaggio durante il periodo di chiusura dell'arco: l'*efficienza*, valutata come somma dei tempi di viaggio, e l'*equità*, misurata come coefficiente di variazione del tempo di viaggio, per considerare la distribuzione degli incrementi dei tempi di viaggio tra gli utenti della rete.

L'efficienza viene valutata attraverso l'Equazione 10:

$$I_{eff}(k) = \sum_{i, j \neq i} \Delta T_{ij}^k$$

Equazione 10

Dove:

- k è l'arco chiuso in esame;
- i, j sono le zone di origine e destinazione;
- T_{ij}^k è l'incremento totale del tempo di viaggio per tutti gli utenti, o veicoli equivalenti, sulla relazione (i, j) , durante la chiusura dell'arco k .

Per valutare l'equità viene utilizzata l'Equazione 11 del coefficiente di variazione:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sum_u p_u (y_u - \bar{y})^2}}{\bar{y}} = \frac{\sqrt{\sum_u p_u \times y_u^2 - \bar{y}^2}}{\bar{y}}$$

Equazione 11

Dove:

- u pari alla coppia OD di riferimento;
- y_u uguale al numero di membri della popolazione;
- p_u pari al peso assegnato da ogni membro della popolazione y_u ;
- $\mu = \bar{y} = \sum_u p_u \times y_u$

Per specificare la variazione per un singolo arco è possibile riscrivere le formule sopra riportate andando a sostituire y_u con l'Equazione 12:

$$y_u^k = \frac{\Delta T_{ij}^k}{x_{ij} \times \tau}$$

Equazione 12

Dove:

- x_{ij} è la media della domanda di viaggio espressa in utenti o veicoli per unità di tempo;
- τ è il tempo per il ripristino della situazione di traffico preesistente alla chiusura dell'arco.

L'equità può quindi essere espressa nel seguente modo:

$$I_{eq}(k) = CV_k = \frac{\sqrt{x \times \sum_{i,j \neq i} \frac{\Delta T_{ij}^{k^2}}{x_{ij}} - \sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^{k^2}}}{\sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^k}$$

Equazione 13

Utilizzando le grandezze ricavate, l'autore indica una procedura per avere un unico indice per ogni arco, che rappresenta una media pesata delle due misure normalizzate:

$$\hat{I}_{eff}(k) = \frac{I_{eff}(k) - \min_l I_{eff}(k)}{\max I_{eff}(k) - \min_l I_{eff}(k)}$$

Equazione 14

$$\hat{I}_{eq}(k) = \frac{I_{eq}(k) - \min_l I_{eq}(k)}{\max I_{eq}(k) - \min_l I_{eq}(k)}$$

Equazione 15

e vale:

$$I_{ew}(k) = (I_{eff}(k))^{1-\alpha} (I_{eq}(k))^\alpha, \alpha \in [0,1]$$

Equazione 16

Dove α è un parametro che permette di controllare l'effetto dell'equità della distribuzione.

Jenelius non si limita a valutare la vulnerabilità solo da un punto di vista statico ma propone anche un approccio di tipo dinamico, introducendo nell'analisi il tempo di chiusura dell'arco e proponendo un'estensione al modello statico dell'equilibrio su reti non congestionate [17]. Il modello consente di valutare sia il caso in cui gli utenti hanno la possibilità di utilizzare un percorso alternativo, sia il caso in cui non ne esistano, permettendo inoltre di considerare l'ipotesi che gli utenti non siano in grado di stabilire fin da subito quale sia il percorso alternativo migliore.

A titolo di esempio si riporta il seguente caso: si consideri dapprima una coppia OD collegata da un solo percorso (che di fatto coinciderà con quello più breve) r_{orig} e un arco k appartenente a tale percorso. La chiusura di tale arco comporterà un processo di informazione agli utenti che si protrarrà nel tempo per un certo periodo di tempo, indipendente dal tempo di chiusura dell'arco:

- a $t < 0$ la quantità di utenti informati della chiusura dell'arco sarà pari a quella di $t = 0$;
- a $t = 1$ ossia dopo un certo periodo di tempo $t_{cl\ inf}$, gli utenti saranno informati;

- nell'intervallo di tempo tra $t = 0$ e $t_{cl\ inf}$ la porzione di utenti informati non è nota ma di sicuro è crescente;

Successivamente avverrà un processo simile, ma con le operazioni di apertura dell'arco $0 \leq b$ e $t \leq 1$ con $t \in [t_{open}, t_{op\ inf}]$

È evidente che se $t_{open} \geq t_{cl\ inf}$, allora tutti gli utenti saranno stati informati prima della riapertura dell'arco, viceversa, ci sarà ancora una porzione di utenti che non sarà raggiunta dall'informazione di chiusura.

Come già anticipato, dopo la chiusura di un arco potranno esserci o meno percorsi alternativi disponibili.

Se esistono percorsi alternativi, dopo la chiusura dell'arco k , gli utenti informati cercheranno il percorso alternativo più breve, Jenelius chiama la rotta più breve r_{short} e il nuovo tempo di percorrenza τ_{short} anche se ovviamente i loro valori saranno superiori a quelli che si avrebbero utilizzando il percorso contenente l'arco che è stato chiuso. L'utente non informato continuerà a percorrere il percorso originale fino al raggiungimento dell'arco interrotto e solo in quel momento cercherà una via alternativa che viene indicata con r_{long} e caratterizzata da un tempo di percorrenza pari a τ_{long} . È chiaro che esiste la seguente relazione: $\tau_{long} \geq \tau_{short} \geq \tau_{orig}$

Quando l'arco viene riaperto, gli utenti potrebbero riutilizzare il percorso originario, tuttavia non è detto che questo accada in quanto dipende dal fatto che gli utenti siano stati informati o meno, nello specifico:

- abbiano ricevuto l'informazione di chiusura e successivamente di riapertura dell'arco;
- abbiano ricevuto solo l'informazione riguardante la chiusura e non la riapertura dell'arco;
- non abbiano ricevuto né l'informazione di chiusura né quella di riapertura dell'arco.

Pertanto, l'incremento del tempo di viaggio dovuto alla chiusura dell'arco k nell'intervallo $[0, t_{op\ inf}]$ è pari a:

$$\Delta T_k = x \int_0^{t_{open}} (\alpha(t)(\tau_{short} - \tau_{orig}) + (1 - \alpha(t))(\tau_{long} - \tau_{orig})) dt + x \int_{t_{open}}^{t_{op\ inf}} \alpha(t)(1 - b(t))(\tau_{short} - \tau_{orig}) dt$$

Equazione 17

dove $\alpha(t)(1 - b(t))$ è la porzione di utenti che al tempo t è stata informata della chiusura e non della riapertura dell'arco k .

Nel caso in cui non esistano percorsi alternativi, gli utenti che sono stati informati prima della partenza possono cancellare il proprio viaggio, mentre gli altri una volta raggiunto l'arco interrotto dovranno tornare indietro. In entrambi i casi l'incremento del tempo di percorrenza viene valutato nello stesso modo, in quanto per semplicità il modello non tiene conto del costo del viaggio sostenuto dagli utenti non informati.

In questo caso l'aumento del tempo di viaggio dovuto alla chiusura dell'arco è dato da due componenti: il ritardo dovuto alla chiusura e il ritardo dovuto al tempo che intercorre tra la riapertura dell'arco $\frac{t_{open}}{2}$ e il momento in cui gli utenti vengono informati della riapertura

$$\int_{t_{open}}^{t_{op\ inf}} (1-b(t))dt .$$

Quindi sapendo che il numero di utenti che si sarebbero messi in viaggio durante il periodo di chiusura è pari a xt_{open} , l'incremento del tempo di viaggio durante tale periodo è pari a:

$$\Delta T_k^{close} = x \left[\frac{t_{open}^2}{2} + t_{open} \int_{t_{open}}^{t_{op\ inf}} (1-b(t))dt \right]$$

Equazione 18

Successivamente l'arco k viene riaperto quindi gli utenti possono riprendere ad utilizzarlo, tuttavia una parte di essi subirà un ulteriore ritardo dovuto al fatto che l'informazione non viene data immediatamente:

$$\int_t^{t_{op\ inf}} (1-b_t(s))ds = \int_t^{t_{op\ inf}} \frac{1-b(s)}{1-b(t)}ds$$

Equazione 19

Con $b_t(s) = \frac{(b(s)-b(t))}{(1-b(t))}$ e s pari all'intervallo di tempo successivo a t , corrispondente al momento in cui gli utenti sono stati informati della riapertura dell'arco.

Considerando che al momento della riapertura gli utenti informati sono pari a $\alpha(t)(1-b(t))$, l'incremento del tempo di viaggio in questo periodo risulta essere pari a:

$$\Delta T_k^{open} = x \int_{t_{open}}^{t_{op\ inf}} \alpha(t)(1-b(t)) \left(\frac{1}{1-b(t)} \int_t^{t_{op\ inf}} (1-b(s))ds \right) dt = x \int_{t_{open}}^{t_{op\ inf}} \alpha(t) \int_t^{t_{op\ inf}} (1-b(s))ds dt$$

Equazione 20

Pertanto l'incremento totale del tempo di viaggio è dato da:

$$\Delta T_k = \Delta T_k^{close} + \Delta T_k^{open}$$

Equazione 21

Infine in uno studio successivo, Jenelius [11] valuta la vulnerabilità stradale dovuta ad un evento con elevata estensione spaziale. In questo caso l'autore non valuta solo la vulnerabilità dei singoli archi ma anche la funzionalità simultanea di più archi di una stessa area sottoposti ad un evento calamitoso. Per svolgere questa analisi occorre coprire l'area di studio con una griglia costituita da celle di dimensione omogenea, in cui ciascuna di esse rappresenta l'estensione dell'evento, come mostra la *Figura 7*.

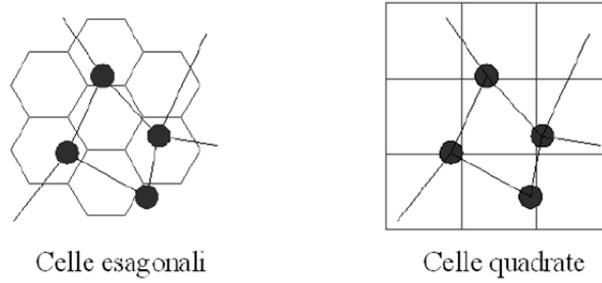


Figura 7 Esempi di griglie di dimensioni differenti

Per ogni cella si individuano gli archi che la intersecano e si valutano gli effetti che si hanno in seguito alla rimozione simultanea di tutti gli archi contenuti in una cella in termini di domanda insoddisfatta e di ritardi degli utenti, valutando così la decrescente accessibilità a fronte di un aumento del costo di viaggio.

Il ritardo complessivo $\Delta T_{ij}^c(\tau)$ per tutti gli utenti che vanno dall'origine i alla destinazione j , durante la chiusura di tutti gli archi contenuti nella cella c per un tempo τ può essere espresso, considerando la domanda di trasporto costante nell'unità di tempo, come:

$$\Delta T_{ij}^c \tau = \begin{cases} x_{ij} \Delta t_{ij}^c \left(\tau - \frac{\Delta t_{ij}^c}{2} \right) & \text{se } 0 \leq \Delta t_{ij}^c \leq \tau \\ \frac{x_{ij} \tau^2}{2} & \text{se } \tau \leq \Delta t_{ij}^c \leq \infty \end{cases}$$

Equazione 22

Dove:

- Δt_{ij}^c indica la differenza di tempo di viaggio fra il percorso originale più breve e il nuovo percorso;
- x_{ij} rappresenta la domanda media tra i e j durante la chiusura.

Se non ci sono strade alternative l'utente è obbligato ad aspettare fino alla riapertura della strada che analiticamente corrisponde ad avere $\Delta t_{ij}^c = \infty$.

L'impatto dovuto alla chiusura degli archi all'interno della griglia è valutato attraverso la definizione di *importanza* di una griglia in modo analogo a quanto fatto per gli archi. L'importanza di una cella c durante un evento di durata τ è pari alla somma dei ritardi totali $\Delta t_{ij}^c \tau$ per tutte le coppie OD:

$$I(c/\tau) = \sum_i \sum_{j \neq i} \Delta T_{ij}^c(\tau)$$

Equazione 23

$$\begin{aligned} I(c/\tau) &= \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \notin C} \sum_{j \in C} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \in C} \sum_{j \notin C} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \notin C} \sum_{j \notin C} \Delta T_{ij}^c \tau = \\ &= \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} x_{ij} + \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \notin C} \sum_{j \in C} x_{ij} + \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \in C} \sum_{j \notin C} x_{ij} + \sum_{i \notin C} \sum_{j \notin C} \Delta T_{ij}^c \tau = I_{int,ern} c/\tau + I_{out} c/\tau + I_{in} c/\tau + I_{cross} c/\tau \end{aligned}$$

Equazione 24

L'Equazione 24 mostra che l'importanza è data dalla somma delle componenti di ritardo che subiscono rispettivamente la domanda interna della zona $I_{int,ern} c/\tau$, la domanda che proviene dall'esterno $I_{out} c/\tau$, quella che proviene dall'interno $I_{in} c/\tau$ e infine quella che attraversa la zona $I_{cross} c/\tau$.

La domanda dovuta agli utenti che devono solo attraversare la zona può essere ulteriormente scomposta in quanto alcuni di essi avranno a disposizione percorsi alternativi mentre altri no, quindi dopo alcuni passaggi si ottiene:

$$I_{cross} c/\tau = I_{uns,cr} c/\tau + I_{det,rs} c/\tau$$

Equazione 25

Dove la prima componente rappresenta la domanda insoddisfatta mentre la seconda indica il disagio causato agli utenti per il fatto di dover utilizzare un percorso alternativo.

L'esposizione per gli utenti viene invece definita come l'impatto medio per utente, a differenza dell'esposizione totale che è data dall'impatto totale sugli utenti [18]. Il primo di questi due indici

può essere utilizzato per valutare la vulnerabilità e viene definito dall'autore attraverso l'Equazione 26:

$$UE_{wc} r | \tau, G = \max_{c \in G} \frac{\sum_{i \in r} \sum_{j \neq i} \Delta T_{ij}^c \tau}{\sum_{i \in r} \sum_{j \neq i} x_{ij} \tau}$$

Equazione 26

Dove:

- r è la regione di studio;
- i è l'origine;
- τ è il tempo di durata dell'evento;
- G è l'insieme delle griglie che vanno a costituire l'area.

Jenelius ha applicato la procedura alla rete di trasporto svedese ed è emerso che i parametri che determinano le conseguenze peggiori sono differenti tra il caso in cui si considera il singolo arco e quello in cui si considera la rete. Se si chiude un solo arco i fattori che influenzano la vulnerabilità sono il flusso sull'arco stesso e la possibilità di utilizzare percorsi alternativi; nel caso in cui ci sia una chiusura di più archi all'interno di un'area interessata da un evento calamitoso, il fattore più importante da considerare è la domanda insoddisfatta. Ovviamente questa è strettamente collegata alla popolazione residente nell'area, quindi saranno la distribuzione e la densità demografica ad incidere maggiormente sulla vulnerabilità della rete.

TAYLOR E D'ESTE

Taylor e D'Este considerano il concetto vulnerabilità distinto da quello di affidabilità [19]: la vulnerabilità è legata alle conseguenze dell'evento e dipende dalla debolezza della rete, mentre l'affidabilità è legata alla probabilità di accadimento di un evento. La misura della vulnerabilità è valutata a livello di rete come variazione del costo generalizzato di trasporto tra lo scenario pre-sisma e post-sisma.

Considerando una rete con nodi N e archi A , vengono calcolati i tempi di percorrenza tra due nodi nel caso in cui si abbia il collasso di un arco; ad ogni nodo viene quindi assegnato un valore, pesato in funzione degli spostamenti generati dal nodo stesso. Il risultato dello studio è dato da una matrice

che contiene la perdita di accessibilità da attribuire ad ogni nodo nel caso in cui ci sia il collasso di un arco.

Nello specifico la riduzione di accessibilità associata alla perdita di funzionalità di un arco è data dall'Equazione 27:

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \times v_{ijrs}$$

Equazione 27

Dove:

- V_{rs} è la vulnerabilità dell'arco rs ;
- i e j è una coppia origine-destinazione;
- d_{ij} sono gli spostamenti (domanda) tra i e j ;
- v_{ijrs} è la differenza del costo generalizzato tra la zona i e la zona j tra il caso di rete intatta e il caso di rete funzionante senza il collegamento rs non è più funzionante; il suo valore è dato dall'Equazione 28

$$v_{ijrs} = s[ij, GN, E] - s[ij, GN, E - rs]$$

Equazione 28

Successivamente gli stessi autori hanno utilizzato specifici indici di vulnerabilità, considerando gli studi fatti da Morris et al. (1979), Koenig (1980), Niemeier (1997) and Primerano (2003), fino a definire i due indici: HANSEN e ARIA, che permettono di valutare le prestazioni della rete nel caso in cui le zone rappresentative dei centri abitati siano più o meno isolate.

L'indice di Hansen è dato da:

$$A_i = \sum_j B_j f(c_{ij})$$

Equazione 29

Dove:

- B_j è l'attrattività delle zona j , definita, ad esempio, dal numero di abitanti della zona;

- $f(c_{ij}) = \frac{1}{x_{ij}}$ è la funzione di impedenza e rappresenta la separazione tra le zone i e j , definita

attraverso il reciproco della distanza (o costo di viaggio) tra i e j .

Questo indice viene usato quando la città sono ben collegate tra loro mentre è scarsamente utilizzato quando gli studi riguardano zone rurali o remote.

L'indice ARIA permette di valutare quanto una città sia isolata misurando la distanza tra aree popolate e le aree in cui sono insediate i centri di produzione. Questo è un indice di tipo continuo e varia da 0 a 15, dove 0 rappresenta le zone con maggior accessibilità e 15 alle aree isolate, e si basa sulla distanza, all'interno della rete, misurata tra le località popolate e i più vicini centri di servizio, suddivisi a loro volta in 5 categorie in base alla popolazione presente: si va dalla categoria A con una popolazione superiore ai 250000 abitanti, alla E con popolazione compresa tra 1000 e 4900 abitanti. Sono definiti centri di servizio quelle località popolate da almeno 1000 abitanti. *Tabella 8* riassume queste categorie.

CENTRI DI SERVIZIO

Categorie dei centri di servizio	Popolazione
A	250000
B	48000 - 249999
C	18000 - 47999
D	5000 - 17999
E	1000 - 4999

Tabella 8 Categorie dei centri di servizio

L'indice è calcolato considerando la distanza x_{iL} di una località i dal più vicino centro di servizio per ciascuna categoria L :

$$ARIA_{iL} = \sum_L \min \left\{ 3, \frac{x_{iL}}{x_L} \right\}$$

Equazione 30

Dove \bar{x}_L rappresenta la distanza media di tutte le località dal più vicino centro di servizio della categoria L . Il limite massimo pari a 3 serve per ottenere un valore di ARIA non superiore a 15.

Questo indice rappresenta una misura puramente geografica e non tiene conto di considerazioni socio-economiche.

3.2.2 Capacità di rete

In alternativa al costo di viaggio, si può utilizzare come parametro prestazionale la capacità di rete.

Questo parametro è una proprietà intrinseca della rete ed è quindi indipendente dalla domanda e dal comportamento degli utenti, ovvero dalla scelta di mettersi o meno in viaggio. Rispetto al costo di viaggio questa unità di misura è presente in letteratura in un numero minore di studi. Questo parametro è stato studiato da Nojima (1998) [20] [21] per valutare gli interventi di ripristino di una rete dopo essere stata colpita da un evento sismico, il cui flusso, ricavato in base alla capacità massima, è stato utilizzato per valutare il Birnbaum measure¹ dei collegamenti della rete stessa. La massima capacità di flusso calcolata da Nojima è però assimilabile ad una misura intermedia utilizzabile per il calcolo del Birnbaum measure, piuttosto che ad un indicatore del livello di performance del sistema.

Gli studi successivi sul tema non sono ad oggi sufficienti per poter essere considerati nella pianificazione degli interventi sulle reti di trasporto in caso di emergenza.

NOJIMA

Chang e Nojima propongono un approccio diverso per valutare le performance di una rete, proponendo una misura indipendente dal flusso, ovvero dipendente dalla lunghezza della rete [22].

L'approccio consiste nel valutare la lunghezza della rete priva di danneggiamenti e confrontarla con la stessa grandezza nel caso in cui la rete sia stata colpita da un evento calamitoso.

$$L = \sum_{i=1}^N l_i$$

Equazione 31

Dove:

- L è la lunghezza totale della rete;
- N è il numero totale degli archi;

¹ Il Birnbaum measure è definito come la derivata parziale della Indisponibilità del sistema rispetto alla Indisponibilità del componente a cui la misura è riferita.

- l_i è la lunghezza di ciascun arco.

L'entità della differenza tra i due valori risulta proporzionale al grado di danneggiamento della rete.

ISSACHAROFF L., LÄMMER S., ROSATO V., HELBING D

Gli autori [23] definiscono una rete (autostradale) vulnerabile se la sua funzionalità è ridotta significativamente da un evento più o meno grave. Viene determinato un indicatore di vulnerabilità in funzione della perdita di funzionalità di alcuni archi.

$$L = \frac{df}{du}$$

Equazione 32

Dove:

- f è la funzionalità della rete che può essere espressa in termini di efficienza o qualità del servizio offerto;
- u rappresenta l'estensione del collasso.

Nel caso autostradale il collasso è spesso associato alla chiusura di uno o più archi. La chiusura di un arco è collegata alle caratteristiche topologiche della rete stessa come ad esempio la posizione degli archi e il grado di connessione della rete.

3.2.3 Raggiungibilità della rete

Definita come la possibilità di partire da un nodo del grafo orientato e di raggiungerne un altro vertice, la raggiungibilità è una delle misure di rete che più frequentemente viene usata, in quanto indica l'esistenza di almeno un percorso che permetta di raggiungere un certo nodo.

Dal 1970 sono stati fatti notevoli progressi per quanto riguarda la connettività della rete e sugli algoritmi proposti per il suo studio. Quest'ultimi possono essere raggruppati in due grandi categorie: algoritmi basati sulla simulazione (ad esempio quello di Montecarlo) e algoritmi di analisi (ad esempio quello di decomposizione).

CHANG

Chang individua un indice di accessibilità capace di fornire una misura della connettività ai centri da cui partono i soccorsi, chiamato “*Probabilità di Accesso*”.

Le prestazioni della rete sono valutate al tempo t dopo il terremoto attraverso l’*Equazione 35*:

$$D_{s,t} = \frac{f - R_{s,t}}{f - 1}$$

Equazione 33

Dove:

- $D_{s,t}$ rappresenta una misura delle prestazioni della rete in termini di accessibilità;
- s è l’unità spaziale su cui viene misurata la differenza di accessibilità;
- f è una costante;
- $R_{s,t}$ è il rapporto di accessibilità di s al tempo t .

$D_{s,t}$ sarà pari 0 nel caso di completa chiusura della rete e 1 se non si ha nessun danno.

A sua volta $R_{s,t}$ è dato da:

$$R_{s,t} = \frac{1}{n_s} \sum_{i \in N_s} R_{i,t}$$

Equazione 34

Dove:

- $R_{i,t}$ è il rapporto di accessibilità al tempo t per la zona i della rete;
- n_s è il numero di zone presenti nell’unità spaziale s considerata;
- N_s è il gruppo di zone in s .

$R_{s,t}$ è la media dei rapporti di accessibilità calcolati per le singole zone.

Infine $R_{i,t}$ viene calcolata con l’*Equazione 35*:

$$R_{i,t} = \left[\sum_{j \neq i} w_{ij} d_{ij} \right] \left[\sum_{j \neq i} w_{ij} d_{ij}^* \right]^{-1}$$

Equazione 35

Dove:

- d_{ij}^* rappresenta la distanza minima tra le zone in caso di rete funzionante;
- d_{ij} rappresenta la distanza minima tra le zone i e j in caso di rete non funzionante a seguito dell'evento;
- w_{ij} sono i pesi attribuiti alla relazione tra le zone, pari al valore della domanda di spostamento.

Sulla rete danneggiata dall'evento, la lunghezza di ciascun arco è valutata moltiplicando la lunghezza iniziale per un moltiplicatore $F(k)$ proporzionale dallo stato di danneggiamento (k), inteso come riduzione della capacità. Questa misura di lunghezza modificata serve a stimare l'aumento del tempo di viaggio che si ha per attraversare l'area danneggiata dal sisma.

SOHN

Questo studio [24], come il precedente, valuta l'*accessibilità* come la variazione di distanza a seguito della chiusura di un arco della rete. La variazione di accessibilità per una data regione è data dall'*Equazione 36*:

$$A_i = 4 \times \left[\alpha \frac{P_i}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \sum_{j=1}^{23} \left(\frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{k=1}^{24} d_{ik}^*} \right) + (1-\alpha) \frac{P_i}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \sum_{j=1}^{23} \left(\frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{t_{ij}}{\sum_{k=1}^{24} t_{ik}^*} \right) \right]$$

Equazione 36

Dove:

- A_i è l'indice di accessibilità della zona i ;
- α è uno scalare utilizzato come peso (compreso tra 0 e 1);
- $p_{i(j)}$ è la popolazione residente nella zona i ;
- d_{ij} rappresenta la distanza minima tra le zone i e j a seguito di un determinato scenario;
- d_{ij}^* rappresenta la distanza minima iniziale tra i e j ;
- $\beta = 0,44$ ed è ottenuto empiricamente;

- $t_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^n AADT_m D_m}{d_{ij}}$ è il traffico medio tra i e j misurato lungo il percorso minimo;
- $AADT_m$ è il traffico giornaliero medio calcolato sull'arco m ;
- d_m è la lunghezza dell'arco m .

L'equazione è composta di due parti: la prima parte tiene conto della lunghezza del percorso minimo nello scenario analizzato, mentre la seconda si riferisce al volume di traffico medio che lo impegna. Per ciascun cammino minimo viene calcolato il volume di traffico medio: questa operazione viene effettuata utilizzando il TGM, il quale è registrato dalle autorità preposte per ciascun segmento della rete assumendo come peso la lunghezza del segmento. Il parametro α permette di controllare l'importanza relativa della distanza e del volume di traffico: per $\alpha=1$ l'indice tiene conto della sola variazione della distanza, e al decrescere di α il termine del volume di traffico assume un'importanza crescente.

Per stabilire quali siano gli archi a cui deve essere data la priorità per la riparazione, viene fatta una misura dell'accessibilità pre- e post-evento mediante la formula:

$$A^j = \sum_{i=1}^{24} A_i - \sum_{i=1}^{24} A_i^j = \sum_{i=1}^{24} (A_i - A_i^j)$$

Equazione 37

Dove:

- A^j è la riduzione di accessibilità (vulnerabilità) quando l'arco j viene interrotto;
- A_i è l'indice di accessibilità della zona i prima che l'arco venga interrotto;
- A_i^j è l'indice di accessibilità della zona i dopo l'interruzione dell'arco j .

SCOTT, NOVAK, AULTMAN-HALL E GUO

Quest'ultimo metodo non è strettamente legato alla raggiungibilità della rete ma comprende tutti e tre gli indicatori, e può essere valutato sia a livello d'arco che di rete.

Gli autori analizzano il concetto di *flessibilità* di una rete di trasporto, che è legato alla sua geometria (caratteristiche fisiche) e al livello di servizio che essa garantisce. La flessibilità viene definita come la capacità sistemica di una rete di trasporto di adattarsi alle variazioni di domanda, in

modo tale da garantire costantemente un livello di servizio adeguato. Una rete flessibile è in grado di mitigare le variazioni di flusso sia per quanto riguarda la quantità di veicoli, sia per la loro distribuzione spaziale.

Un'altra caratteristica che viene considerata è l'*affidabilità* di una rete di trasporto. Essa può essere espressa in termini di costo di viaggio: se il costo è concorde con quello atteso dagli utenti anche in situazioni di critiche allora la rete è affidabile, in caso contrario non lo è. Gli autori legano questa caratteristica al grado di connessione della rete e al comportamento degli utenti, mentre altri studi visti precedentemente lo definiscono come un indice di performance (probabilità che una rete possa soddisfare una certa domanda di traffico in base ad un determinato livello di servizio).

Partendo da studi fatti da altri autori, Scott e altri [25] analizzano i concetti di flessibilità e affidabilità non più attraverso misure localizzate del livello di servizio, ma considerano un punto di vista globale del problema. Considerando ad esempio il rapporto volume/capacità, se $V/C > 1$ la rete è congestionata, ma tale approccio consente solamente un'analisi localizzata che spesso non è rappresentativa della realtà.

Si consideri ad esempio il seguente problema:

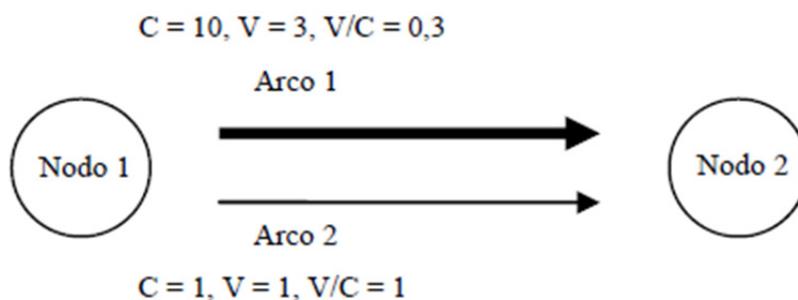


Figura 8 Esempio di rete

Analizzando solamente il rapporto V/C l'arco 2 risulta essere il più critico, ma da un'analisi più approfondita è possibile notare che il volume dell'arco 1 è tre volte maggiore rispetto a quello dell'arco 2, quindi una sua interruzione non consentirebbe una redistribuzione dei flussi. Per questi motivi l'arco più critico risulta essere il numero 1.

Gli autori presentano poi un secondo indice detto "*indice di connettività o gamma index*", che considera non soltanto i flussi di traffico e la capacità ma anche il grado di connessione della rete. Esso varia tra 0 e 1, dove 1 corrisponde alla rete completamente connessa, e dipende solamente

dalla geometria della stessa rete, considerando la relazione esistente tra il numero di archi nella rete e e il massimo numero di archi possibile e_{max} :

$$\gamma = \frac{e}{e_{max}}$$

Equazione 38

Il valore massimo di archi possibili in una rete è dato da:

$$e_{max} = 3v - 2$$

Equazione 39

Con v pari al numero totale di nodi della rete.

I due indici devono essere usati contemporaneamente per analizzare in modo adeguato la rete, quindi è necessario definire un nuovo indice basato sull'analisi dei tempi di viaggio, chiamato NRI (Network Robustness Index). L'analisi considera, oltre alla capacità dei singoli archi, anche la possibilità di trovare un percorso alternativo che permetta di mantenere i costi, definiti in tempi di viaggio, accettabili.

Per prima cosa si definiscono i tempi di viaggio in relazione ai flussi:

$$t_a = \text{tempi di viaggio} = t_a x_a$$

$$x_a = \text{flussi}$$

Si definisce per ogni arco un indice di costo pari al costo generalizzato dovuto alla rimozione di ogni arco:

$$c_a = \sum_a t_a \times x_a \times \delta_a$$

Equazione 40

δ_a assume due valori differenti a seconda che l'arco in cui si stia valutando il costo sia quello rimosso o meno:

$$\delta_a = \begin{cases} 1 \rightarrow & \text{se } a \text{ è l'arco rimosso} \\ 0 \rightarrow & \text{se } a \text{ non è l'arco rimosso} \end{cases}$$

Parallelamente si calcola il costo di viaggio nel caso in cui tutti gli archi siano transitabili:

$$c = \sum_a t_a \times x_a$$

Equazione 41

Infine si può definire NRI:

$$NRI = c_a - c$$

Equazione 42

Nella *Tabella 9* vengono riportati sinteticamente gli indici presentati in questa rassegna; è interessante osservare la sovrapposizione tra le diverse metodologie per la definizione di indici più complessi.

Legenda:

- indicatore utilizzato dall'autore
- indicatore parzialmente utilizzato dall'autore
- indicatore non utilizzato dall'autore

TABELLA RIASSUNTIVA AUTORI/METODOLOGIE

Autore	Perditempo e costo di viaggio	Capacità di rete	Connettività
Jenius e altri	●	○	●○
Taylor e D'Este	●	○	●○
Husdal	●	○	○
Issacharoff, lämmer, rosato, helbing	○	●	○
Berdica	○	○	●
Cafiso	○	○	●
Yan Li	○	○	●
Sohn	○	○	●
Scott, Novak, Aultman-Hall e Guo	●	●	●

Tabella 9 Indici proposti per la valutazione della vulnerabilità

4 *MODELLAZIONE DELLA DOMANDA DI VIAGGIO*

La domanda di mobilità che si sviluppa in situazioni di emergenza, come ad esempio nel caso di evento sismico, è generalmente molto diversa rispetto a quella che si osserva in situazioni “normali”. In questi casi è quindi necessario modificare i classici modelli di domanda, perché le ipotesi su cui essi si basano non sono estendibili anche ad eventi straordinari, e introdurre modelli di domanda di viaggio più realistici per rappresentare il comportamento che assume l’utente dopo un evento sismico.

4.1 *Rassegna dei modelli di domanda presenti in letteratura*

In letteratura [13] esistono numerosi modelli per la modellazione della domanda di trasporto in condizioni “normali”, ma solo pochi sono stati sviluppati per essere utilizzati anche in condizioni di emergenza. Tra di essi è possibile citare:

- Oak Ridge Evacuation Modeling System (ORMES);
- Dynamic Network Evacuation (DYNEV);
- Transportation Emergency Management of Post-Disasters Operations (TEMPO);
- Evacuation Traffic Information Systems (ETIS);

ORMES è stato progettato per stimare il tempo di evacuazione e sviluppare strategie di gestione del traffico in scenari diversi [26] [27] [28], inoltre permette di identificare percorsi di evacuazione tenendo conto di tutti i fenomeni che si possono creare come ad esempio i “colli di bottiglia” [29]. DYNEV era tradizionalmente utilizzato per simulare le evacuazioni da centrali nucleari e successivamente è stato migliorato per essere utilizzato in caso di uragani [29] [28] [30]. ETIS è anch’esso utilizzato nel caso di grandi evacuazioni dovute a uragani [28].

La modellazione della domanda di trasporto e del traffico che si sviluppa a seguito dei terremoti è molto più complessa rispetto a quella di uragani o di incidenti di tipo nucleare, in quanto è influenzata dal deterioramento che le infrastrutture di trasporto subiscono a causa del sisma. Inoltre, a causa dell’imprevedibilità di questi fenomeni, la risposta delle popolazioni sarà molto istintiva, ciò rende il modello di traffico post-sisma meno dipendente dalla classica risposta comportamentale o dal modello di caricamento della rete. TEMPO è un sistema di supporto alle decisioni sviluppato dopo il terremoto di Loma Prieta, il quale affronta in modo specifico le esigenze di trasporto a seguito di un sisma come ad esempio la circolazione dei veicoli di emergenza e la deviazione del

traffico [31]. Questo modello, però, si basa esclusivamente sul danno fisico che subiscono le infrastrutture di trasporto (ad esempio la chiusura delle strade) e non considera il cambiamento degli spostamenti a seguito dell'evento.

La domanda degli spostamenti prima del terremoto risulta essere solitamente inappropriata per la valutazione delle performance della rete post-sisma, anche se in via semplificativa viene spesso adottata nelle valutazioni. L'arco temporale in cui il sisma si verifica influenza sensibilmente il numero di vittime e la loro distribuzione spaziale, dal momento che la distribuzione della popolazione varia nel tempo. Per questa ragione gli scenari più adeguati per la modellazione della domanda dovrebbero considerare in maniera specifica l'istante temporale di riferimento (il momento della giornata, il giorno della settimana e il periodo dell'anno).

In tal senso sono state realizzate ricerche diverse per stimare il cambiamento della domanda nel lungo e nel breve periodo, così come introdotto al §3.

Nel caso di domanda post-sisma a breve termine, i modelli proposti possono essere raggruppati in due categorie: variazione del modello di domanda attraverso la modifica della matrice OD precedente al terremoto [32] [33], oppure l'utilizzo di metodi di assegnazione alternativi come il "*modified incremental assignment method*" (MIAM) [34] e il "*metodo di domanda variabile*" (VDM) [35] [36].

Shinozuka et al. [32] hanno stimato la matrice di domanda post-terremoto modificando i dati di origine-destinazione pre-sisma. Essi hanno introdotto fattori di riduzione per considerare la diminuzione di capacità dovuta all'occupazione delle strade e le diverse finalità degli spostamenti. Successivamente sono stati impiegati una combinazione di modelli di assegnazione e distribuzione per valutare il ritardo di viaggio. Tuttavia non sono stati tenuti in considerazione fattori determinanti come ad esempio strutture di emergenza e il rilascio di sostanze pericolose (HAZMAT).

Kim [37] prende atto di questi due fattori per valutare la modifica di domanda: nelle zone soggette al rilascio di sostanze pericolose la capacità dei collegamenti viene ridotta all'1% del valore riferito alle condizioni normali, mentre nelle aree rifugio la domanda viene incrementata del 30%.

Chang [13] adatta il classico modello di generazione/attrazione al caso della domanda post-sisma inserendo alcune ipotesi:

- Evacuazione delle persone coinvolte dagli edifici danneggiati. Vista l'impossibilità di avere informazioni precise circa gli abitanti dei fabbricati è necessario supporre che i danni siano

uniformemente distribuiti tra i vari edifici e che le persone che li occupano appartengano alla stessa categoria sociale;

- Generazione degli spostamenti assunta proporzionale alla quantità di popolazione colpita e uniforme all'interno della zona di traffico [38].
- Centri di emergenza ed ospedali sono assunti come punti d'attrazione per feriti e sfollati in modo proporzionale alle loro capacità.
- Se una zona non presenta strutture danneggiate, la generazione degli spostamenti non sarà influenzata dal sisma, mentre nelle zone danneggiate il numero di spostamenti aumenta a causa dei danni subiti dagli edifici, degli incendi e del rilascio di sostanze pericolose;
- Se una zona non offre strutture di emergenza o ospedali la sua attrattività rimarrà invariata e viceversa;

Un'altra categoria di approccio alla modellazione della domanda di viaggio post-sisma è quella di rappresentare le variazioni di domanda mediante modelli di assegnazione di traffico alternativi [39] [40] [36].

Nojima e Sugito [68] hanno proposto il modified incremental assignment method (MIAM) un modello di assegnazione alternativo per ottenere la matrice OD post-sisma. Il MIAM carica le reti danneggiate con spostamenti origine-destinazione pre-sisma e la matrice OD che si ottiene è diversa da quella antecedente l'evento perché parte degli spostamenti OD può non essere soddisfatta a causa dell'irraggiungibilità dei centroidi, di sovraccarichi e/o congestioni della rete. Tuttavia questo metodo è in grado di fornire una soluzione approssimata e generalmente non equilibrata [41].

Kiremidjian et al. [36] hanno definito l'equilibrio attraverso un modello a domanda variabile (VDM), e comparato i ritardi di viaggio dovuti ai danni provocati dal sisma con un modello a domanda fissa (FDM). Il VDM assume ragionevolmente che la domanda di viaggio sia di tipo elastico, ad esempio che la domanda di viaggio diminuisca all'aumentare del tempo di percorrenza tra due centroidi a causa della riduzione di capacità del link, mentre il modello di domanda fissa ipotizza che la domanda di viaggio non cambi dopo il sisma. Gli autori hanno concluso che: con il metodo FDM il tempo di percorrenza aumenta sensibilmente dopo il sisma e che con il metodo VDM il tempo di percorrenza rimanga relativamente invariato.

Nel caso di domanda post-sisma a lungo termine, è possibile utilizzare modelli multi-regionali input-output [44], di minor interesse in rapporto agli obiettivi di questa tesi.

5 *MODELLAZIONE DELLA RIDUZIONE DI FUNZIONALITA' NEGLI ARCHI DI UNA RETE STRADALE A SEGUITO DI UN SISMA*

La relazione danno strutturale – funzionalità definisce la capacità di traffico residua delle componenti di una rete stradale a seguito di un particolare stato di danno. Per definire il danno strutturale vengono utilizzate le cosiddette “curve di fragilità”, che mettono in relazione il livello di intensità sismica con la probabilità di superamento di un certo stato limite. La funzionalità di un sistema dipende invece dal grado di manutenzione delle infrastrutture e dalla loro capacità di traffico. Per sviluppare la relazione danno – funzionalità vengono utilizzati tre tipi di procedimento: empirico, analitico e basato sull’opinione di esperti.

L’approccio empirico si basa su dati empirici ricavati da osservazioni fatte su eventi passati, e necessita di una grande quantità di informazioni per fornire risultati rappresentativi. Ciò rende il suo utilizzo non sempre possibile, ma limitato ai casi in cui l’area da studiare sia stata in passato soggetta ad eventi sismici.

L’approccio analitico utilizza dati riguardanti la riparazione dei danni e il ripristino della situazione originaria. Ad esempio, per quanto riguarda i ponti, sono presenti in letteratura alcuni modelli che permettono di valutarne la funzionalità, misurata ad esempio attraverso i tempi di chiusura del ponte, e di prendere le decisioni per il suo restauro.

L’utilizzo dell’opinione di esperti si basa sull’opinione espressa da tecnici esperti, solitamente attraverso la compilazione di questionari, chiamati a stimare le tempistiche per il ripristino di una certa infrastruttura. Spesso questa tecnica conduce a risultati poco affidabili, a causa della scarsa collaborazione da parte dei professionisti e della stretta dipendenza dalle opinioni personali.

Nel presente lavoro di tesi la modellazione della riduzione di funzionalità negli archi verrà presentata in rapporto a strutture puntuali (ponti), e a strutture diffuse (edifici affacciati sulle strade).

5.1 *Strutture puntuali (ponti)*

I ponti ricoprono un ruolo di primaria importanza all’interno di un sistema di trasporto stradale: la loro perdita di funzionalità comporta infatti un impatto rilevante sulle prestazioni del sistema e quindi sulla possibilità di spostare persone e cose dopo un terremoto. Il danno strutturale e la

capacità dei ponti possono essere stimate utilizzando curve di fragilità che permettono di definire la probabilità di superamento di uno certo stato limite per un sisma di una data intensità.

In letteratura i metodi che vengono presentati per ottenere le curve di fragilità sono di due tipi: metodi empirici e metodi analitici. I metodi empirici consistono nella raccolta di dati ottenuti da una serie di fenomeni sismici avvenuti in passato (senza utilizzare codici di calcolo), elaborati poi dalla normativa americana Hazus e la corrispettiva europea Risk-UE. I metodi analitici invece si basano sulla modellazione della struttura in un codice di calcolo, per poi lanciare una serie di analisi: analisi statiche lineari, analisi statiche non lineari (pushover) e analisi dinamiche non lineari (time-history). La precisione di questo di questo secondo tipo di analisi è maggiore, ma lo è anche l'onere computazionale.

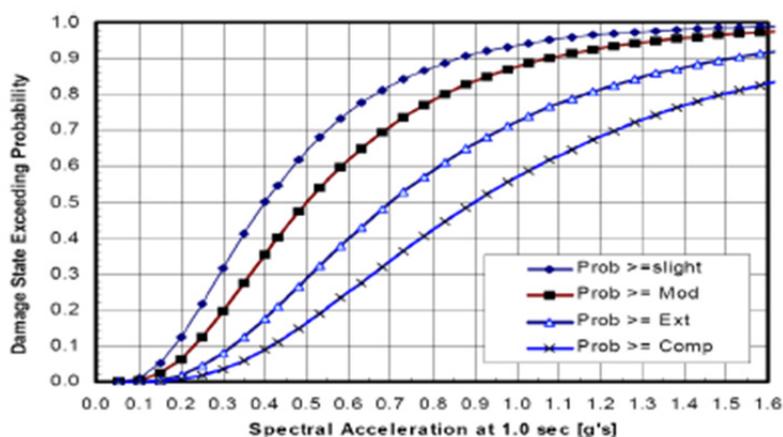


Figura 9 Esempio di curva di fragilità di un ponte

Alcuni esempi di queste curve sono stati realizzati dal MAE Center, dell'Università dell'Illinois, per l'analisi delle tipologie di ponti maggiormente ricorrenti nelle zone centrali e Sud-Orientali degli Stati Uniti [42]. Nello sviluppo di queste curve, sono stati presi in considerazione cinque schemi di intervento di adeguamento sismico comuni per i ponti: installazione di appoggi elastomerici, cavi di ritenuta, tiranti metallici, aumento della superficie di appoggio delle travi, tacchi di taglio in corrispondenza dei giunti.

Queste curve considerano singolarmente le varie componenti strutturali del ponte che possono essere messe in crisi dal sisma, tra cui le pile, gli appoggi fissi, i giunti di dilatazione, le fondazioni e le spalle.

L'utilizzo dei modelli analitici tridimensionali, per valutare le singole componenti di fragilità mediante analisi dinamiche non lineari, consente di esaminare il comportamento nel tempo delle

componenti del ponte quando vengano interessate da un'azione sismica: le prestazioni di questi singoli elementi sono poi utilizzate per determinare la risposta complessiva del ponte.

La capacità ricavata viene poi confrontata con la domanda di progetto per il sito in questione. La fragilità strutturale è spesso modellata con una distribuzione lognormale [43] [44] [45] e da un punto di vista analitico può essere espressa come:

$$P(LS_i | PGA = a) = \Phi\left(\frac{\ln a - \lambda_i}{\beta_i}\right)$$

Equazione 43

dove Φ_i è la funzione di densità cumulativa della distribuzione normale standard, a indica l'intensità della scossa sismica e λ_i e β_i sono la media e la dispersione della distribuzione lognormale per l' i -esimo stato limite di un particolare tipo di struttura. I parametri di fragilità (λ_i e β_i) sono legati alla domanda strutturale e alla capacità, che sono quantitativi essenziali per lo sviluppo della curva.

Il MAE Center ha individuato quattro tipi di danno che un ponte può subire: insignificante (I), moderato (M), pesante (H), completo (C). Per una data PGA, le probabilità del ponte di trovarsi nello stato di danno possono essere calcolate, a partire dalla probabilità di eccedere lo stato limite, come segue:

$$P(DS = None) = 1 - P(Slight | PGA)$$

Equazione 44

$$P(DS = Slight) = P(Slight | PGA) - P(Moderate | PGA)$$

Equazione 45

$$P(DS = Moderate) = P(Moderate | PGA) - P(Extensive | PGA)$$

Equazione 46

$$P(DS = Extensive) = P(Extensive | PGA) - P(Complete | PGA)$$

Equazione 47

$$P(DS = Complete) = P(Complete | PGA) - 0 = P(Complete | PGA)$$

Equazione 48

Combinando quindi le equazioni è possibile calcolare, per un terremoto di qualsiasi intensità, la probabilità che un ponte si trovi in un particolare stato di danno.

La procedura Risk-UE porta a risultati analoghi a quanto appena descritto, infatti anche in questo caso vengono supposti quattro stati di danno identici a quelli appena citati: danno lieve (Slight Damage), danno moderato (Moderate Damage), danno esteso (Extensive Damage) e danno completo (Complete Damage).

5.1.1 Relazione tra danno e funzionalità di un ponte

La relazione tra danno e funzionalità definisce la capacità di traffico di un ponte che si trova in un particolare stato di danno. Questo rapporto definisce la probabile capacità di un ponte (C) ad un determinato valore di danno (D) al tempo (T):

$$P(C = c | D = d \cap T = t)$$

Equazione 49

La *Tabella 10* descrive la funzionalità del ponte a diversi livelli di danno e il tempo per il recupero [46] (la capacità di traffico ammissibile è disponibile solo a tre livelli: 0%, 50% e 100%):

Damage Level	Traffic Carrying Capacity (%)					
	Day 0	Day 1	Day 3	Day 7	Day 30	Day 90
None	100	100	100	100	100	100
Slight	50	100	100	100	100	100
Moderate	0	50	50	100	100	100
Extensive	0	0	0	50	50	100
Complete	0	0	0	0	0	0

Tabella 10 Funzionalità del ponte a diversi livelli di danno e tempo di recupero

Il MAE Center definisce inoltre la funzionalità continua calcolata come la media ponderata del traffico del ponte per la capacità di carico. In seguito al teorema di probabilità totale, la funzionalità continua può essere data come segue:

$$\text{funzionalità del ponte} = \sum_{i=1}^3 \{ \text{Weighting Factor} * \text{Capacity Level} \} =$$

$$\sum_{i=1}^3 \{ \left[\sum P(\text{Damage State}) \right] * \text{Capacity Level} \}$$

Equazione 50

dove $i=\{1,2,3\}$ corrisponde ai tre livelli di capacità di traffico (0%, 50%, 100%) e $P(\text{damage state})$ rappresenta la probabilità dello stato di danno dato dalle equazioni sopra.

5.2 Strutture diffuse (edifici affacciati su strada)

In questa sezione si analizzano alcune proposte per la valutazione della funzionalità degli archi di una rete stradale urbana in condizioni di emergenza sismica, sulla base del danneggiamento subito dagli edifici affacciati sulla strada.

Cafiso [6] propone una procedura per valutare la vulnerabilità sismica di una rete urbana, attraverso un indice complessivo di danno, calcolato secondo i seguenti passi:

- Si stima un indice di vulnerabilità geometrico (I_{gv}) del tronco stradale, definito in base alla larghezza della strada (L) e alle dimensioni degli edifici vicini (H_1, H_2):
- Si stima un indice di danno complessivo (I_{dc}) per il tronco stradale, che tiene conto anche della vulnerabilità strutturale degli edifici che si trovano ai margini della strada, associando ad ogni edificio un *indice di danno (ide)*:

Cafiso propone inoltre un metodo per valutare la vulnerabilità in modo qualitativo e quantitativo, combinando una valutazione della vulnerabilità strutturale (V_s) e una valutazione di quella funzionale (V_f). Per quanto riguarda la prima occorre compilare delle “check list” relative agli elementi stradali danneggiati, mentre la seconda dipende dalla presenza o meno di percorsi alternativi che possono essere individuati nella rete. La vulnerabilità del tronco stradale può essere valutata attraverso l’Equazione 51:

$$V_g = V_s \times G \times R_e$$

Equazione 51

Dove:

- V_g è la vulnerabilità globale del tronco stradale;

- V_s è la vulnerabilità strutturale determinata in base alle “check list”;
- G sono le caratteristiche geometriche;
- R_e misura dei percorsi alternativi al tronco considerato.

Valutazione dell'indice di vulnerabilità geometrica I_{vg} della strada

La valutazione di questo indice viene effettuata su tutti i tronchi della rete, intendendo per tronco “un tratto stradale compreso tra due intersezioni adiacenti e, dunque, privo di intersezioni interne”.

L'indice di vulnerabilità geometrica viene definito in base alla larghezza utile della strada ed al massimo della somma delle altezze di due edifici “affacciati” adiacenti al tronco, ovvero:

$$I_{vg} = \min [L - (H_1 + H_2)]$$

Equazione 52

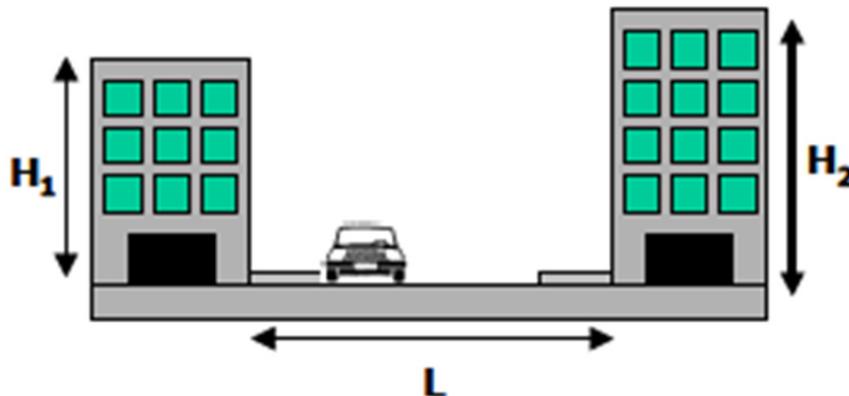


Figura 10 Schema rappresentativo

Questo indice dimensionalmente è una lunghezza e rappresenta, per ciascun tronco, un indicatore del residuo utile per il transito, nel caso in cui si abbia un completo “ribaltamento” della facciata degli edifici sulla sezione stradale. Sulla base dei valori assunti dall'indice, è determinare l'indice di vulnerabilità geometrica I_{vg} , secondo quanto riportato nella *Tabella 11*.

CLASSIFICAZIONE DELL'INDICE DI VULNERABILITA' GEOMETRICA

Valori I_{vg}	$I_{vg} > 5$	$2.5 < I_{vg} \leq 5$	$I_{vg} \leq 2.5$
Vulnerabilità	Nulla	Bassa	Alta

Tabella 11 Valutazione delle classi di indice di vulnerabilità geometrica I_{vg}

Dai dati di *Tabella 11* si deduce che per una larghezza maggiore di 5 m il transito dei mezzi non viene influenzato e che 2.5 è la soglia minima per consentire “fisicamente” il transito.

Valutazione dell'indice di danno complessivo della strada

L'ambiente urbano, a causa della sua complessità, deve essere analizzato considerando l'insieme dei sistemi che lo compongono. Per questo motivo la rete viaria non può essere studiata senza considerare la vulnerabilità strutturale degli edifici a margine della strada, infatti la normativa italiana prevede che questi non possano avere altezze superiori a determinati limiti in funzione delle dimensioni della carreggiata stradale. Tuttavia queste disposizioni trovano scarso impiego a causa della notevole quantità di edifici costruiti in tempi passati.

Al fine dunque di determinare la vulnerabilità dei tronchi stradali risulta necessario stabilire quella degli edifici costruiti a margine della strada. Essi possono riportare sia danni strutturali che non strutturali, nel primo caso si parla di danni ad elementi portanti come travi o pilastri, nel secondo si considerano elementi che non ne determinano l'instabilità come cornicioni, tramezzi ecc. Per valutare la vulnerabilità degli edifici dopo il terremoto è sufficiente rilevarne i danni, mentre più complessa è la valutazione pre-sisma, per la quale si possono utilizzare diverse metodologie: di tipo statistico, di carattere meccanico, o basate sul giudizio di esperti. Secondo la prima categoria vengono classificati gli edifici in base al tipo di materiali e alle tecniche costruttive utilizzate, successivamente essi vengono comparati con edifici simili che hanno subito danneggiamenti durante terremoti di diverse magnitudo. Utilizzare questo metodo non è sempre possibile in quanto non sempre si può disporre di dati relativi a terremoti avvenuti in tempi precedenti. Per i metodi meccanici si utilizzano modelli che riproducono le principali caratteristiche degli edifici da valutare e su questi vengono simulati dei terremoti in modo da poterne valutare gli effetti. Infine il giudizio di esperti permette di valutare quali potrebbero essere i danni provocati da terremoti di diverse magnitudo su varie tipologie strutturali, oppure di individuare quali potrebbero essere i fattori che vanno ad incidere sul comportamento della struttura, per poterne valutare l'influenza sulla vulnerabilità del fabbricato.

Gli indici di danno degli edifici (Ide) corrispondenti alle diverse classi introdotte dal GNDDT (Gruppo Nazionale Difesa terremoti) sono riportati nella *Tabella 12*.

CLASSIFICAZIONE DEGLI INDICI DI DANNO DEGLI EDIFICI

Classe di danno	1	2	3	4	5
GNDT	(assenza)	(lieve)	(medio)	(grave)	(collasso)
Coeff. Ide	0	0.2	0.5	0.7	1

Tabella 12 Valutazione degli indici di danno degli edifici (Ide)

A questo punto è quindi possibile definire l'**indice di danno complessivo della strada Idc** in base ai due indici precedentemente determinati (Igv e Ide), mediante la relazione:

$$Idc = \min[L - (Ide1 \times H1 + Ide2 \times H2)]$$

Equazione 53

Questo indice rappresenta una evoluzione dell'indice Igv perché tiene conto delle caratteristiche strutturali e di resistenza sismica degli edifici a margine. Per le definizioni adottate risulta sempre $Igv \leq Idc$, ai fini della corretta e rapida interpretazione del parametro si può utilizzare la *Tabella 13*.

VALUTAZIONE DELL'INDICE DI DANNO COMPLESSIVO

Igv	Igv > 5	2.5 < Igv ≤ 5		Igv ≤ 2.5	
Idc	Qualsiasi	Idc > 7	Idc ≤ 7	Idc > 5	Idc ≤ 5
Classe di danno	Nulla	Bassa	Media	Alta	Molto alta
	0	1	2	5	10

Tabella 13 Valutazione delle classi di indici di danno complessivo (Idc) della strada

Oltre all'approccio sviluppato da Cafiso, la quantificazione del potenziale occupato dal crollo di un edificio aggettante la strada può essere stimata anche attraverso la logica fuzzy (insiemi sfuocati). La logica fuzzy si basa su ragionamenti approssimati piuttosto che esatti, ovvero quel tipo di ragionamento che viene adottato nella vita di tutti i giorni, lontano dagli schemi dettati dalla logica bivalente, che richiede formulazioni ed analisi rigorose e precise.

6 PROCEDURA DI MITIGAZIONE – RETROFITTING

In caso di evento catastrofico diffuso quale un sisma, si è sottolineato che è di fondamentale importanza garantire l’operatività della rete di trasporto o che la sua funzionalità venga ripristinata nel più breve tempo possibile. Attraverso l’allocazione ottimale delle risorse, è possibile definire un piano di interventi da eseguire preventivamente sull’intera rete al fine di adeguare o migliorarne le componenti, minimizzando gli impatti sul sistema territorio-trasporti. Questa procedure sono comunemente indicate con il nome di procedure di mitigazione – retrofitting e saranno brevemente descritte in questo capitolo

6.1 Impostazione delle procedure

In letteratura sono state proposte diverse procedure finalizzate all’identificazione di un piano d’azione ottimale da applicare ad una rete di trasporto, per minimizzare l’impatto prodotto su di essa da parte un evento sismico. Prendendo come riferimento lo schema proposto recentemente da [47], è possibile (Figura 11) descrivere l’architettura solitamente adottata in questi casi.

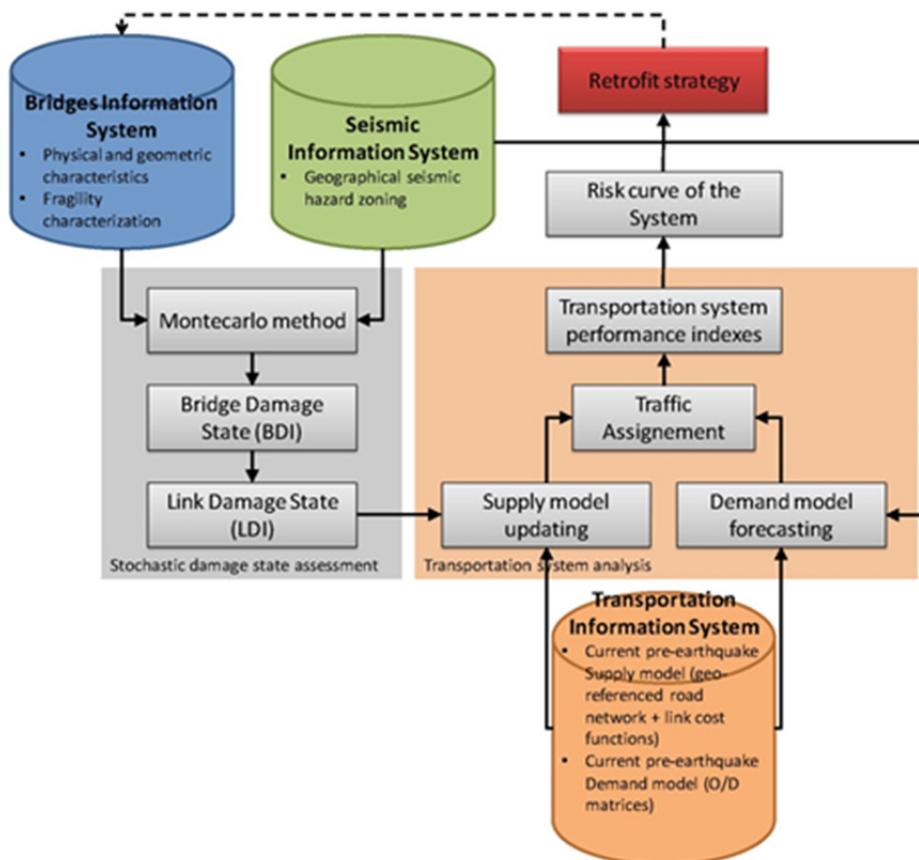


Figura 11 Architettura della procedura integrata

6.1.1 Sistemi Informativi settoriali

Le tre componenti principali della procedura sono [94]:

- Sistema Informativo relativo a ponti-viadotti (Bridge Information System - BIS);
- Sistema Informativo sismico (Seismic Information System - SIS);
- Sistema informativo trasporti (Transportation Information System - TIS).

Bridges Information System

Nel sistema informativo relativo a ponti sono raccolte i dati relativi alle caratteristiche strutturali dei ponti presenti nella rete oggetto di studio (lunghezza, numero di campate, materiali, anno di costruzione, ..). Queste informazioni sono ottenute dagli enti gestori della rete o recuperate attraverso specifiche indagini e sono finalizzate alla valutazione dei parametri di fragilità (curve di fragilità) di ciascun ponte (inserire il riferimento).

Seismic Information System

Questo sistema contiene i dati necessari alla realizzazione della mappa di pericolosità sismica, generalmente archiviati e gestiti in un Sistema Informativo Geografico (GIS).

Transportation Information System

Il sistema informativo trasporti raccoglie le informazioni relative al sistema di trasporto considerato nell'analisi (stato pre-sisma) e si articola nei sottosistemi della domanda di mobilità e dell'offerta. L'interazione tra domanda e offerta (assegnazione della domanda alla rete) permette di valutare lo stato del sistema attraverso opportuni indici di prestazione (inserire riferimento). I sotto-sistemi della domanda e dell'offerta sono aggiornati rispetto allo stato iniziale (stato pre-sisma) sulla base degli effetti indotti dal sisma sul sistema (stato post-sisma), valutato attraverso i medesimi indici di prestazione.

La tre componenti interagiscono tra di loro secondo più processi sequenziali, tra loro connessi:

- Valutazione dello stato di danno, ossia la valutazione di come il danno strutturale subito da un ponte a seguito del sisma, influisca sulla funzionalità dell'arco stradale ad esso associato;
- Analisi del sistema di trasporto, ossia alla valutazione della di indici del sistema di trasporto;
- Strategia di retrofitting, ossia l'individuazione degli interventi di mitigazione da approntare preventivamente per migliorare le prestazioni del sistema in caso di sisma.

6.1.2 Valutazione dello stato di danno

A seguito del sisma, gli elementi dell'infrastruttura producono una risposta fisica, espressa in termini di danno fisico, in funzione della loro vulnerabilità. Per ciascun elemento critico vale dunque la relazione:

$$RFi_i = St_i \times VuFi_i$$

Equazione 54

Dove:

- RFi_i = risposta fisica dell'elemento i-esimo dell'infrastruttura (conseguenza dell'evento);
- St_i = stimolo a cui l'elemento è sottoposto (nel caso di terremoto dipende dall'intensità del sisma e dalla distanza dell'infrastruttura dall'epicentro);
- $VuFi_i$ = sensibilità fisica dell'i-esimo elemento infrastrutturale (vulnerabilità fisica).

Nel caso della procedura presentata, la sensibilità sismica viene rappresentata dalle curve di fragilità dei ponti (raccolte nel sistema informativo ponti), che esprimono la probabilità che il manufatto subisca un certo livello di danno a seguito dello stimolo a cui è sottoposto (intensità sismica).

I dati raccolti nel sistema informativo sismico permettono di generare degli scenari sismici ipotetici, sulla base della sismicità dell'area di studio. Ogni scenario sismico si traduce in una certa intensità sismica a cui è soggetto ciascun elemento della rete.

Per determinare la risposta fisica di ciascun manufatto (stato di danno) si può utilizzare il metodo di Monte Carlo, che permette di stimare il valore medio di una variabile attraverso un'indagine campionaria. In tal modo è possibile passare da un'analisi di matrice probabilistica (curve di fragilità – scenari sismici) in un risultato deterministico (stato di danno del manufatto).

6.1.3 Analisi del sistema di trasporto

L'analisi del sistema di trasporto viene effettuata attraverso la determinazione di opportuni indici di prestazione [47] a seguito dell'interazione tra domanda e offerta (assegnazione della domanda alla rete). I sotto-sistemi della domanda e dell'offerta sono aggiornati rispetto allo stato iniziale (stato pre-sisma) sulla base degli effetti indotti dal sisma sul sistema (stato post-sisma), valutato attraverso i medesimi indici di prestazione.

6.1.4 *Strategia di retrofitting*

In termini generali l'attività di retrofitting migliora le prestazioni di un manufatto (ponte) e conseguentemente ne modifica la curva di fragilità. L'identificazione di una strategia può avvenire seguendo diversi approcci, ma una volta determinata indica una priorità negli interventi da effettuare sui manufatti (ponti). Per individuare la migliore strategia possibile, solitamente vincolata alle risorse allocabili, si analizzano gli scenari di intervento valutando le prestazioni del sistema nelle nuove configurazioni migliorative.

7 CASO STUDIO: RETE URBANA DI CONEGLIANO (TV)

Gli indici di vulnerabilità presentati al §3 sono stati implementati con riferimento al caso di studio di una rete stradale urbana. Si è analizzato l'impatto provocato da diversi scenari sismici considerando la situazione che si potrebbe venire a creare a qualche giorno dall'evento sismico, ossia quando la fase di gestione dell'emergenza è terminata.

7.1 Inquadramento del problema

Il caso di studio ha riguardato l'analisi della vulnerabilità sismica della rete stradale della città di Conegliano (TV), a seguito di eventi sismici di diversa entità (magnitudo pari a 5.8, 6.0, 6.3, 6.6) ed epicentro (distanza pari a 2 km o 10 km dal centro cittadino), per un totale di 8 scenari.

Le ipotesi di lavoro più importanti dal punto di vista modellistico hanno riguardato la scelta di considerare una riduzione della funzionalità degli archi stradali (in termini di capacità) dovuta al solo crollo o danneggiamento di ponti, e una domanda invariata rispetto alla situazione pre-sisma.

La vulnerabilità della rete stradale è stata analizzata utilizzando gli indicatori descritti in precedenza (vedi §3.2), considerando gli impatti generati da ciascun scenario sismico sulla rete stradale. Più nel dettaglio, sono stati applicati i seguenti indici di vulnerabilità:

- Importanza di Jenelius con w_{ij} pari a 1;
- Importanza di Jenelius con w_{ij} pari al valore della domanda di spostamento pre-sisma;
- Efficienza di Jenelius;
- Vulnerabilità di Taylor e D'Este;
- Indice NRI di Scott, Novak, Aultman-Hall e Guo;
- Prestazioni della rete di Chang
- Lunghezza complessiva della rete di Chang e Nojima.

Successivamente gli stessi indicatori sono stati adottati per verificare se la strategia di retrofitting ottimale identificata per uno specifico scenario di evacuazione post-sisma lo sia anche dal punto di vista introdotto con questa analisi di vulnerabilità

7.2 Analisi della rete

In precedenti lavori di tesi sono stati individuati i ponti del Triveneto e catalogati in un database, indicando le principali caratteristiche strutturali di ognuno. Nel comune di Conegliano sono stati identificati in totale 50 ponti tra tombini, ponti mono-campata, ponti multi-campata e ponti ferroviari (Figura 12).

Nell'area di studio considerata sono presenti solo 34 dei 50 ponti citati, ai quali sono stati attribuite le relative curve di fragilità e i costi di ripristino ad essi associati, grazie ad un precedente lavoro di tesi [48].

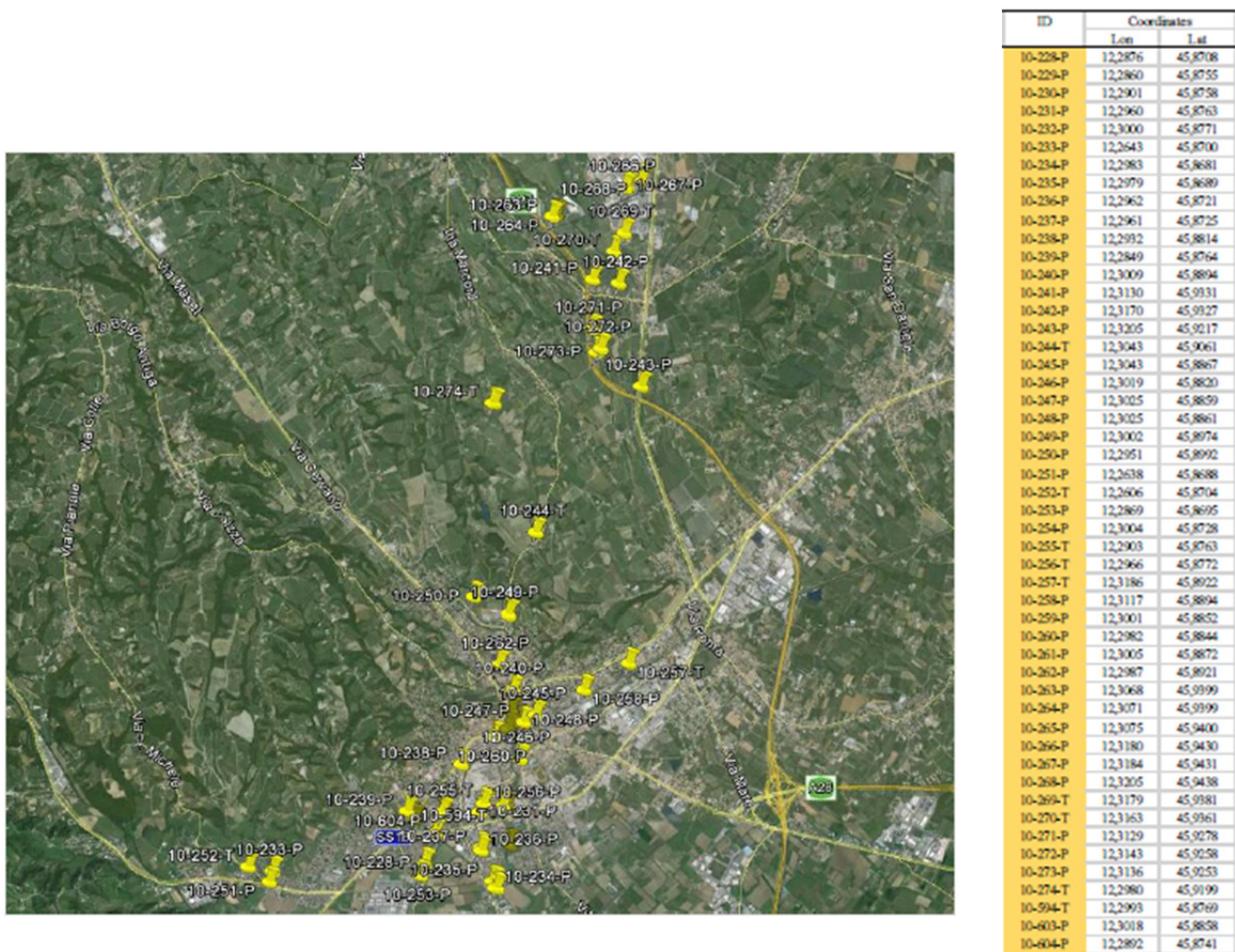


Figura 12 Ponti geolocalizzati nel comune di Conegliano con le relative coordinate geografiche

7.2.1 Dati di input

Il calcolo degli indici di vulnerabilità è stato implementato all'interno del software commerciale per la modellistica dei sistemi di trasporto *CUBE*, sviluppato dall'azienda americana Citilabs.

I dati di input necessari per la valutazione sono:

- Modello della rete stradale dell'area di studio;
- Matrice O/D degli spostamenti;
- Ponti: ubicazione, scenari di danneggiamento e costi di adeguamento sismico.

7.2.1.1 Modello della rete stradale

Il modello della rete stradale dell'area di studio è stato utilizzato anche in altri lavori di tesi finalizzati allo studio dell'evacuazione post-sisma e risulta aggiornato. Il grafo relativo alla porzione di rete di interesse è formato da 1428 archi e 436 nodi di cui 111 nodi centroidi. Come già introdotto all'inizio del capitolo, l'offerta infrastrutturale è rappresentata nel grafo da archi che riproducono le caratteristiche geometrico-funzionali e da nodi che schematizzano le intersezioni. Pertanto ogni arco presente nel grafo sarà caratterizzato da valori specifici degli attributi lunghezza, velocità, capacità, gruppo di appartenenza (per evidenziare eventuali divieti di percorrenza relativi ad alcune categorie veicolari), tipologia, tempo di percorrenza, capacità ridotta a seguito del sisma, costo di adeguamento sismico del ponte.

Nella *Figura 13* viene rappresentato il grafo della rete, con un'indicazione relativamente alle zone di attesa e le zone di ricovero, non utilizzate nell'analisi condotta.

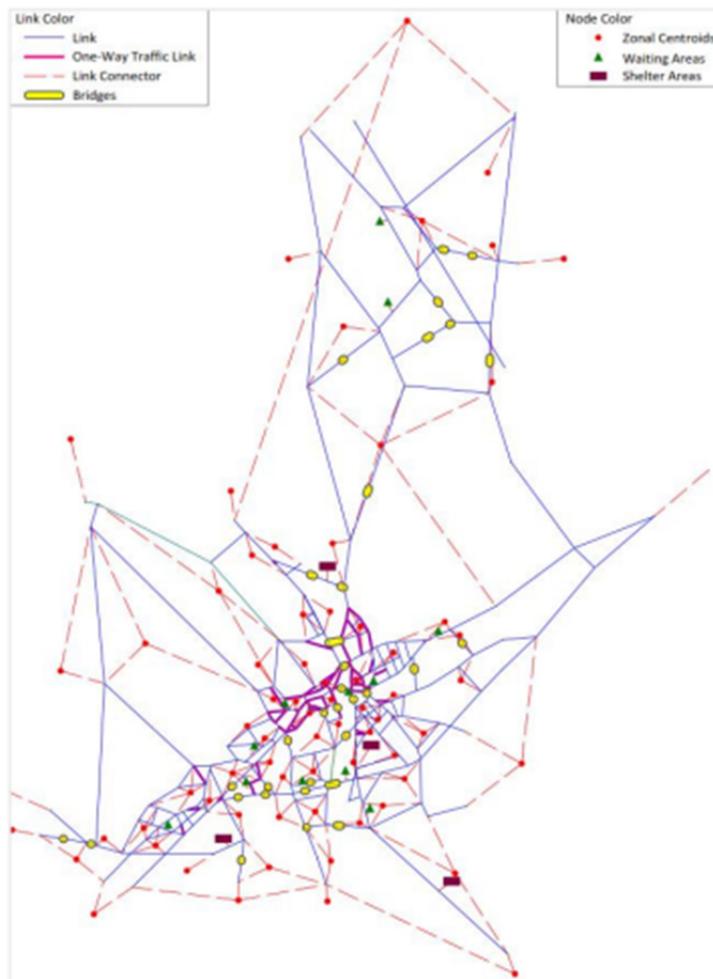


Figura 13 Grafo della rete stradale

7.2.1.2 Matrice degli spostamenti

La domanda di spostamento attuale è rappresentata da una matrice origine-destinazione espressa in veicoli equivalenti relativa all'ora di punta del mattino, di un giorno feriale tipo, già utilizzata in altri lavori di tesi al pari del grafo dell'offerta.

In *Figura 14* viene riportato un estratto di questa matrice, nella quale i nodi con numerazione inferiore a 100 rappresentano i centroidi zonali di zone commerciali, industriali e abitative interne, mentre quelli con numerazione superiore a 100 sono centroidi zonali esterni, ovvero relativi a località esterne a Conegliano. La matrice è di forma quadrata 111x111 ($i = 1, \dots, 111$ righe e $j = 1, \dots, 111$ colonne). I totali di riga rappresentano la somma degli spostamenti generati da ciascuna zona i a tutte le zone j -esime, mentre i totali di colonna rappresentano la somma degli spostamenti generati da ciascuna zona j a tutte le zone i -esime, per un totale di 17954 spostamenti.

✓ *1 Spostamenti																												
Sum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
17954	255	766	222	82	49	87	791	121	185	856	24	0	0	90	90	334	6	210	556	554	169	267	321	155	135	383	156	235
1	151	0	0	0	7	6	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	6	0	6	7	0	0	0	0
2	118	5	0	0	0	6	0	0	0	6	0	0	0	0	6	11	0	5	0	11	0	6	0	0	0	12	0	0
3	276	14	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	22	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0
4	227	14	0	0	0	0	0	0	0	20	7	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	7	0	0	0	0	0
5	67	0	6	0	0	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	0	0	0	0	0	0	0
6	137	9	9	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	17	17	0	0	0	0	0	0	9	0	
7	349	11	0	0	0	13	0	0	0	13	0	0	0	0	13	25	0	11	0	30	0	13	0	0	0	13	0	0
8	296	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0
9	258	0	22	0	0	0	19	0	11	5	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5	10	0	5	10	5	0	0	0
10	93	0	0	0	7	6	0	0	0	11	0	0	0	0	5	0	0	4	6	0	0	0	0	6	0	0	4	0
11	174	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
12	56	0	6	0	0	0	3	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
13	57	0	0	7	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
14	360	12	0	18	6	0	4	0	6	18	0	0	0	0	24	0	6	6	12	0	12	6	0	0	0	0	0	0
15	325	0	25	0	0	0	13	0	0	6	0	0	0	0	38	0	7	13	0	0	6	6	6	0	0	0	0	13
16	255	6	6	13	0	15	3	0	0	0	0	0	0	33	19	6	0	6	6	0	6	6	6	6	6	12	0	0
17	196	0	17	0	6	0	9	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	6	11	0	0	0	22	6	0
18	617	10	44	10	5	5	22	5	10	10	0	0	0	5	0	10	0	23	48	14	11	0	5	5	10	0	0	16
19	336	0	0	0	0	0	5	12	5	0	0	0	5	0	0	0	10	11	18	10	6	12	0	0	0	0	0	
20	478	0	11	6	0	0	20	0	10	11	0	0	0	11	0	0	10	16	0	11	6	6	6	0	0	6	23	
21	304	17	6	11	0	0	3	0	0	17	0	0	0	0	11	0	17	22	17	11	0	0	0	0	0	0	0	6
22	177	0	12	0	0	0	6	0	0	6	0	0	0	0	0	0	12	12	0	0	0	12	0	0	0	0	0	10
23	96	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0
24	183	0	0	6	0	0	2	0	0	12	0	0	0	6	0	0	0	6	6	0	0	0	18	6	0	0	7	
25	86	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	5	0	0	0	0	0	
26	540	13	17	0	0	8	9	0	0	8	0	0	0	8	27	0	7	6	15	0	20	0	6	6	12	0	12	
27	244	0	0	18	0	0	4	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0	18	18	18	0	0	0	0	
28	140	0	7	0	0	0	4	0	0	6	0	0	0	0	6	0	0	0	18	6	0	0	7	5	24	0	0	

Figura 14 Estratto della matrice di domanda degli spostamenti

7.2.1.3 Ubicazione, scenari di danneggiamento e costi di adeguamento sismico dei ponti considerati

L'adeguamento sismico garantisce una migliore risposta sismica del ponte se sollecitato da un evento di una data magnitudo, consentendo di ridurre la gravità dei danni a cui esso può essere sottoposto. Nel caso in cui questi interventi non vengano effettuati il ponte può subire una riduzione di capacità o addirittura il crollo di alcune sue parti.

Come precedentemente descritto, gli scenari considerati in questo studio sono 8, sulla base della combinazione tra la distanza dell'epicentro del sisma dal centro abitato ($D=02$, $D=10$) e la magnitudo ($M=5.8$, $M=6.0$, $M=6.3$, $M=6.6$). In ogni scenario sismico, ciascun ponte può subire un certo danno strutturale, espresso dall'indice di danno BDI (Bridge Damage Index), dove 0 indica nessun danno, 1 danno lieve, 2 danno moderato, 3 danno esteso e 4 danno completo

Conseguentemente al danno strutturale, vi è un riduzione della funzionalità dell'arco, espressa dall'indice LDI (Link Damage Index) dell'arco del grafo corrispondente al ponte.

La Tabella 14 [48] riporta gli indici di danno BDI dei ponti calcolati per ciascun scenario sismico. La capacità residue degli archi sono sintetizzate nella Tabella 15.

ID	Bridge Damage Index							
	D=0.2M=5,8	D=0.2M=6,0	D=0.2M=6,3	D=0.2M=6,6	D=1.0M=5,8	D=1.0M=6,0	D=1.0M=6,3	D=1.0M=6,6
10-228-P	2	2	2	2	1	1	1	1
10-229-P	2	2	2	3	1	1	1	2
10-230-P	4	4	4	4	3	3	3	4
10-231-P	2	2	2	3	1	1	1	2
10-232-P	4	4	4	4	3	3	4	4
10-233-P	1	2	2	2	1	1	1	1
10-234-P	3	3	3	4	1	2	2	2
10-235-P	3	3	3	4	1	2	2	2
10-236-P	2	2	2	2	1	1	1	1
10-237-P	2	2	2	2	1	1	1	1
10-238-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-239-P	2	2	2	2	1	1	1	1
10-240-P	3	3	3	4	1	2	2	3
10-241-P	3	3	3	4	3	3	3	4
10-242-P	1	2	2	2	1	2	2	2
10-243-P	2	3	3	4	2	3	3	3
10-244-T	2	2	2	2	1	1	2	2
10-245-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-246-P	3	3	3	4	1	2	2	3
10-247-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-248-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-249-P	2	2	2	3	1	1	2	2
10-250-P	2	2	2	3	1	1	2	2
10-251-P	1	2	2	2	1	1	1	1
10-252-T	1	2	2	2	1	1	1	1
10-253-P	2	2	2	2	1	1	1	1
10-254-P	4	4	4	4	3	3	3	4
10-255-T	2	2	2	3	1	1	1	2
10-256-T	2	2	2	3	1	1	1	2
10-257-T	2	2	2	3	1	1	1	2
10-258-P	2	2	2	3	1	1	1	2
10-259-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-260-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-261-P	1	1	1	2	1	1	1	1
10-262-P	3	3	3	4	2	2	2	3
10-263-P	1	1	1	1	1	1	1	1
10-264-P	1	1	1	1	1	1	1	1
10-265-P	1	1	1	1	1	1	1	1
10-266-P	1	2	2	3	2	2	3	3
10-267-P	1	1	2	2	1	2	2	2
10-268-P	1	1	2	2	1	2	2	2
10-269-T	2	2	2	3	2	2	3	3
10-270-T	2	2	2	3	2	2	3	3
10-271-P	3	3	3	4	2	3	3	4
10-272-P	1	1	1	1	1	1	1	1
10-273-P	1	1	1	1	1	1	1	1
10-274-T	1	1	1	1	1	1	1	1
10-594-T	2	2	2	3	1	1	1	2
10-603-P	1	1	2	2	1	1	1	1
10-604-P	2	2	2	3	1	1	1	2

Tabella 14 Indici di danneggiamento dei ponti selezionati

Damage state	Residual capacity (%)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
No damage	100	100	100	100
Minor damage	100	100	100	100
Moderate damage	75	50	25	50
Major damage	50	25	10	25
Collapse	50 ^a	25 ^a	10 ^a	0

Tabella 15 Capacità residue del ponte in funzione del danno

Nei casi 1-2-3 si può notare come la capacità residua dell'arco a seguito del collasso totale del ponte comporti una capacità residua maggiore di zero, giustificato dal fatto che si tiene conto della ridondanza fornita dalle arterie secondarie. Nella simulazione della rete di Conegliano è stato utilizzato il criterio 4 per valutare la capacità residua dell'arco, in quanto ritenuto maggiormente rappresentativo delle condizioni reali.

Le 4 classi di funzionalità del caso 4 possono essere riassunte in questo modo:

- Funzionalità al 100%: l'arco non presenta nessuna riduzione di transitabilità; capacità e velocità di percorrenza non subiscono variazioni (LDI pari a 0 e 1);
- Funzionalità al 50%: la capacità dell'arco è pari a metà di quella di progetto di ponte; gli effetti dinamici delle correnti veicolari vengono limitate (LDI pari a 2);
- Funzionalità al 25%: l'arco presenta danni estesi quindi viene garantito un flusso minimo pari a 1/4 della capacità di progetto (LDI pari a 3);
- Funzionalità allo 0%: l'arco è completamente collassato quindi non è possibile alcun transito su di esso; la capacità viene posta pari a 0 (LDI pari a 4).

Nella *Tabella 16* sono riportate le capacità residue degli archi in funzione dello stato di danno (LDI) in cui si trovano.

Link Damage Index	Residual Capacity
No Damage - 0	100%
Slight Damage - 1	100%
Moderate Damage - 2	50%
Extensive Damage - 3	25%
Complete Damage - 4	0%

Tabella 16 Capacità residua degli archi in funzione al LDI

Per determinare la risposta fisica di ciascun ponte (stato di danno) è stato utilizzato il metodo di Monte Carlo, che permette di stimare il valore medio di una variabile attraverso un'indagine campionaria. I risultati di questa analisi per i ponti di Conegliano sono riportati nella *Tabella 17* [48], in termini di capacità residua dei ponti a seguito del sisma rispetto allo stato iniziale.

ID	Bridge Residual Capacity							
	D=02 M=5,8	D=02 M=6,0	D=02 M=6,3	D=02 M=6,6	D=10 M=5,8	D=10 M=6,0	D=10 M=6,3	D=10 M=6,6
10-228-P	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-229-P	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-230-P	0%	0%	0%	0%	25%	25%	25%	0%
10-231-P	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-232-P	0%	0%	0%	0%	25%	25%	0%	0%
10-233-P	100%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-234-P	25%	25%	25%	0%	100%	50%	50%	50%
10-235-P	25%	25%	25%	0%	100%	50%	50%	50%
10-236-P	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-237-P	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-238-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-239-P	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-240-P	25%	25%	25%	0%	100%	50%	50%	25%
10-241-P	25%	25%	25%	0%	25%	25%	25%	0%
10-242-P	100%	50%	50%	50%	100%	50%	50%	50%
10-243-P	50%	25%	25%	0%	50%	25%	25%	25%
10-244-T	50%	50%	50%	50%	100%	100%	50%	50%
10-245-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-246-P	25%	25%	25%	0%	100%	50%	50%	25%
10-247-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-248-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-249-P	50%	50%	50%	25%	100%	100%	50%	50%
10-250-P	50%	50%	50%	25%	100%	100%	50%	50%
10-251-P	100%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-252-T	100%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-253-P	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-254-P	0%	0%	0%	0%	25%	25%	25%	0%
10-255-T	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-256-T	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-257-T	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-258-P	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-259-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-260-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-261-P	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%
10-262-P	25%	25%	25%	0%	50%	50%	50%	25%
10-263-P	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10-264-P	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10-265-P	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10-266-P	100%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	25%
10-267-P	100%	100%	50%	50%	100%	50%	50%	50%
10-268-P	100%	100%	50%	50%	100%	50%	50%	50%
10-269-T	50%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	25%
10-270-T	50%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	25%
10-271-P	25%	25%	25%	0%	50%	25%	25%	0%
10-272-P	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10-273-P	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10-274-T	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10-594-T	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%
10-603-P	100%	100%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-604-P	50%	50%	50%	25%	100%	100%	100%	50%

Tabella 17 Capacità residue dei ponti di Conegliano

Per alcuni di questi ponti, lavori di tesi precedenti [48] hanno stimato i costi di adeguamento sismico relativi alla migliore tipologia di adeguamento sismico per ciascuno di essi. I ponti in questione sono 8 e vengono rappresentati in *Figura 15*. La scelta degli interventi è stata fatta in base alla tipologia di ponte: tombini/mono-campata o dei multi-campata. Per i primi, data la loro bassa vulnerabilità al sisma, non si ha ragione di eseguire interventi di tipo preventivo. Ai fini della simulazione vengono comunque identificati come elementi vulnerabili della rete, quindi viene associata una riduzione della capacità ma non un corrispondente costo di adeguamento sismico.



Bridge 10-230-P



Bridge 10-232-P



Bridge 10-240-P



Bridge 10-241-P



Bridge 10-243-P



Bridge 10-246-P



Bridge 10-254-P



Bridge 10-271-P

Figura 15 Ponti multi-campata per i quali è stato proposto un costo di adeguamento sismico
I costi di adeguamento vengono riassunti nella *Tabella 18*.

ID	type of retrofit	cost of retrofit [€]
10-230-P	Seat Extenders	9.400,00
10-232-P	Seat Extenders	15.800,00
10-240-P	Elastomeric Bearing	43.982,40
10-241-P	Elastomeric Bearing	26.693,00
10-243-P	Shear Keys	19.000,00
10-246-P	Elastomeric Bearing	20.697,60
10-254-P	Steel Jacket	24.000,00
10-271-P	Elastomeric Bearing	18.480,00

Tabella 18 Costi di adeguamento sismico

A fronte di una spesa per un adeguamento sismico, si ha un miglioramento della risposta sismica del manufatto, garantendo migliori prestazioni in termini di capacità residue. Le considerazioni appena fatte possono essere osservate dalle *Tabella 19* e *Tabella 20*.

ID	Residual capacity bridge asbuilt							
	D=02 M=5,8	D=02 M=6,0	D=02 M=6,3	D=02 M=6,6	D=10 M=5,8	D=10 M=6,0	D=10 M=6,3	D=10 M=6,6
10-230-P	0%	0%	0%	0%	25%	25%	25%	0%
10-232-P	0%	0%	0%	0%	25%	25%	0%	0%
10-240-P	25%	25%	25%	0%	100%	50%	50%	25%
10-241-P	25%	25%	25%	0%	25%	25%	25%	0%
10-243-P	50%	25%	25%	0%	50%	25%	25%	25%
10-246-P	25%	25%	25%	0%	100%	50%	50%	25%
10-254-P	0%	0%	0%	0%	25%	25%	25%	0%
10-271-P	25%	25%	25%	0%	50%	25%	25%	0%

Tabella 19 Capacità residue dei ponti a seguito del sisma senza adeguamento dei ponti

ID	Residual capacity bridge retrofit							
	D=02 M=5,8	D=02 M=6,0	D=02 M=6,3	D=02 M=6,6	D=10 M=5,8	D=10 M=6,0	D=10 M=6,3	D=10 M=6,6
10-230-P	25%	25%	25%	25%	100%	50%	50%	25%
10-232-P	25%	25%	25%	25%	50%	50%	50%	25%
10-240-P	100%	100%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-241-P	100%	100%	50%	50%	100%	100%	50%	50%
10-243-P	100%	100%	50%	50%	100%	100%	50%	50%
10-246-P	100%	100%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
10-254-P	50%	25%	25%	25%	100%	50%	50%	50%
10-271-P	100%	100%	50%	50%	100%	100%	50%	50%

Tabella 20 Capacità residue dei ponti a seguito del sisma con adeguamento sismico

7.2.2 *Analisi dei risultati – Confronto tra scenari sismici*

L'obiettivo di questa prima analisi è quello di verificare che gli indicatori di vulnerabilità proposti in letteratura siano concordi nel valutare la vulnerabilità di una rete, nel senso di creare una gerarchia di scenari coerente alla pericolosità degli scenari stessi.

Preliminarmente al calcolo degli indicatori, gli scenari sismici sono stati ordinati in ordine crescente di pericolosità, sulla base della riduzione di capacità complessiva dei ponti (*Tabella 17*) prodotta da ciascun scenario. Questo è l'ordinamento degli scenari prodotto:

- Scenario 1: $D = 10$ km e $M = 5.8$;
- Scenario 2: $D = 10$ km e $M = 6.0$;
- Scenario 3: $D = 10$ km e $M = 6.3$;
- Scenario 4: $D = 2$ km e $M = 5.8$;
- Scenario 5: $D = 10$ km e $M = 6.6$;
- Scenario 6: $D = 2$ km e $M = 6.0$;
- Scenario 7: $D = 2$ km e $M = 6.3$;
- Scenario 8: $D = 2$ km e $M = 6.6$.

7.2.2.1 *Analisi degli indicatori nei diversi scenari*

JENELIUS: IMPORTANZA

L'indicatore è stato calcolato considerando i percorsi di minimo tempo di percorrenza a rete scarica per ogni relazione O-D; per gli archi danneggiati è stata ridotta anche la velocità limite di percorrenza proporzionalmente alla riduzione di capacità. Poiché questo indicatore prevede che venga adottata una matrice dei pesi, si è proceduto al calcolo con due diverse configurazioni. Nel primo caso è stata utilizzata la matrice identità (ogni coppia O-D assume la stessa importanza), mentre nel secondo caso è stata posta pari alla matrice OD degli spostamenti (le relazioni più importanti sono quelle con maggiore domanda di spostamento). I risultati ottenuti sono riportati nella *Figura 16* e in *Figura 17*.

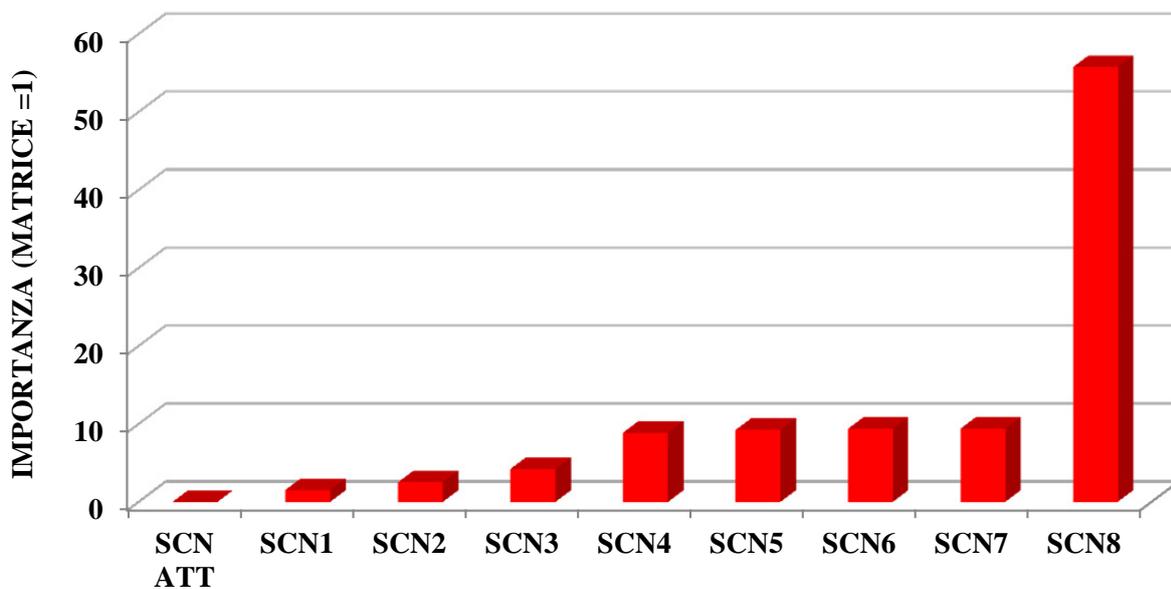


Figura 16 Istogramma che riporta il valore dell'importanza per ogni scenario (pesi pari a 1)

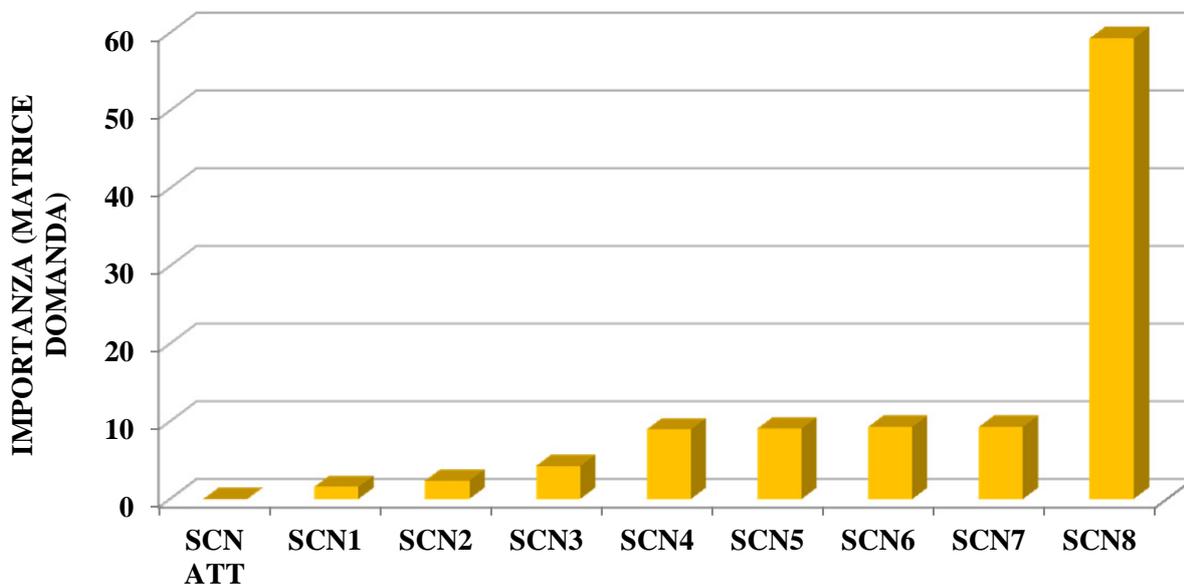


Figura 17 Istogramma che riporta il valore dell'importanza per ogni scenario (pesi pari alla domanda)

Come è facile osservare, l'indicatore (adimensionale) restituisce chiaramente l'ordinamento degli scenari in rapporto alla loro pericolosità, con la netta preponderanza dello scenario di massimo danno 8. Gli scenari 4-7 presentano prestazioni tra loro paragonabili, come era prevedibile osservando la capacità residua dei ponti (Tabella 19).

JENELIUS: EFFICIENZA

L'indicatore è stato calcolato come somma dei tempi totali di percorrenza, considerando i percorsi di minimo tempo di percorrenza a rete carica per ogni relazione O-D. I risultati ottenuti sono riportati nella *Figura 18*, per quanto riguarda lo scenario 8, il valore dell'indicatore era molto più elevato degli altri, ma è stato troncato per permetterne la rappresentazione in un unico grafico.

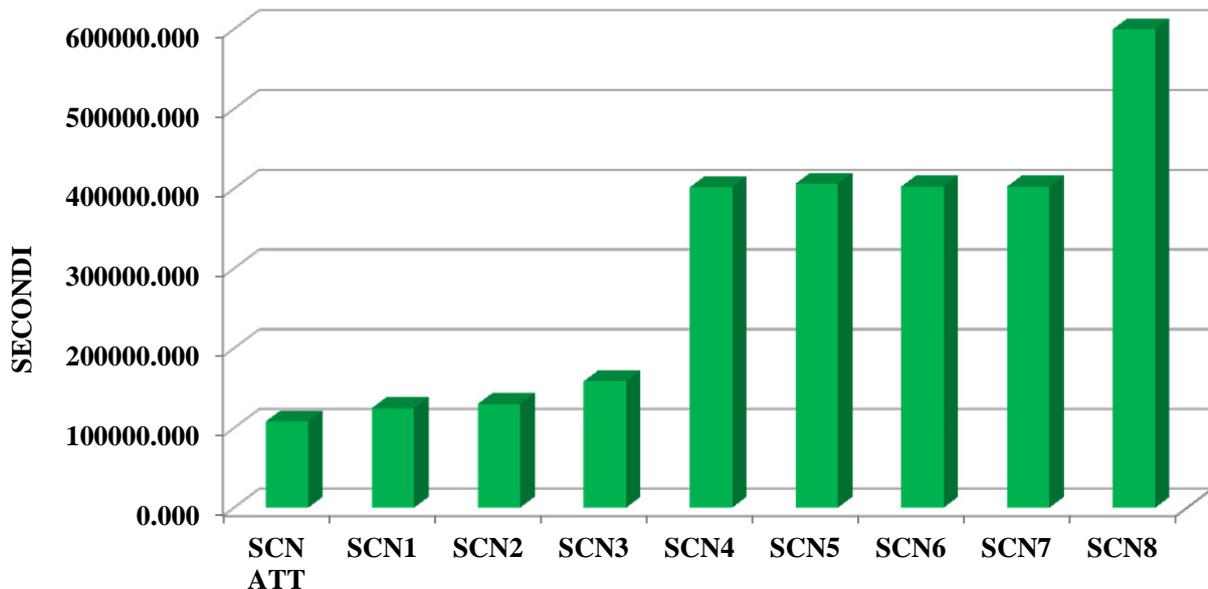


Figura 18 Istogramma che riporta il valore dell'efficienza per ogni scenario

Anche in questo caso l'indicatore restituisce l'ordinamento degli scenari atteso; dall'osservazione del grafico emerge inoltre, ancor più chiaramente che in precedenza, la somiglianza tra gli scenari 4-7.

TAYLOR E D'ESTE: VULNERABILITA'

L'indicatore proposto da Taylor e d'Este, simile a "l'importanza" di Jenelius, è stato calcolato sulla base della matrice dei tempi di percorrenza, determinata nelle stesse ipotesi assunte nel caso dell'indicatore di importanza. In questo caso la matrice dei pesi è stata posta pari alla matrice degli spostamenti. I risultati ottenuti sono riportati nella *Figura 19*. Dai risultati non stupisce dunque la somiglianza con l'indicatore di Jenelius, vista la somiglianza tra i due nella costruzione dell'indicatore.

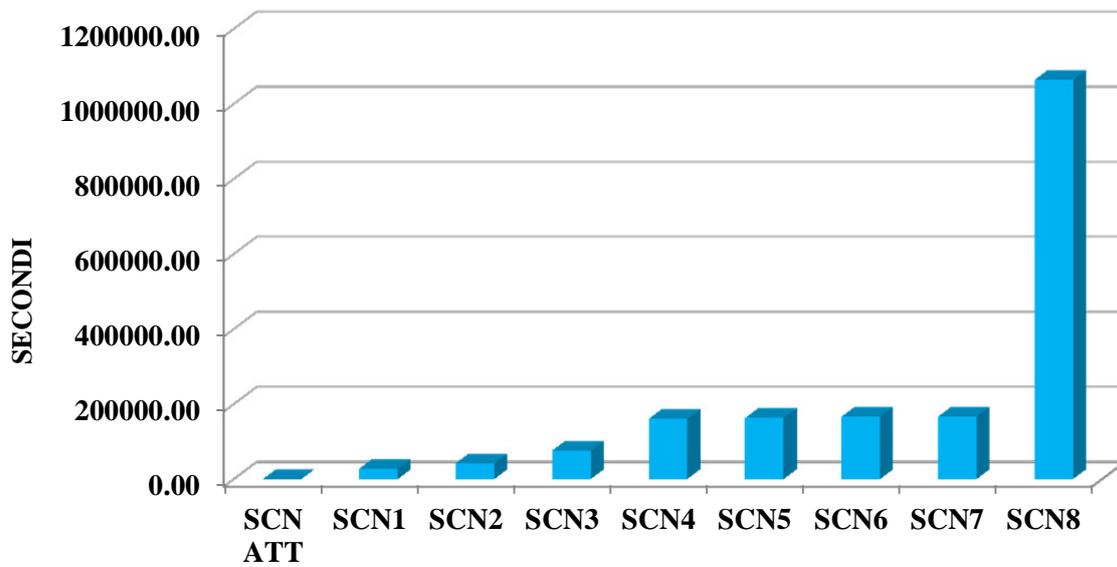


Figura 19 Istogramma che riporta il valore della vulnerabilità per ogni scenario

SCOTT, NOVAK, AULTMAN-HALL, GUO: NRI

L'indicatore è stato calcolato sulla base della differenza dei tempi totali di percorrenza tra lo scenario pre-sisma e quello post-sisma. I risultati riportati nella *Figura 20* confermano ancora una volta l'ordinamento atteso (lo scenario 8 è escluso in quanto le differenze risultano eccessive per la rappresentazione).

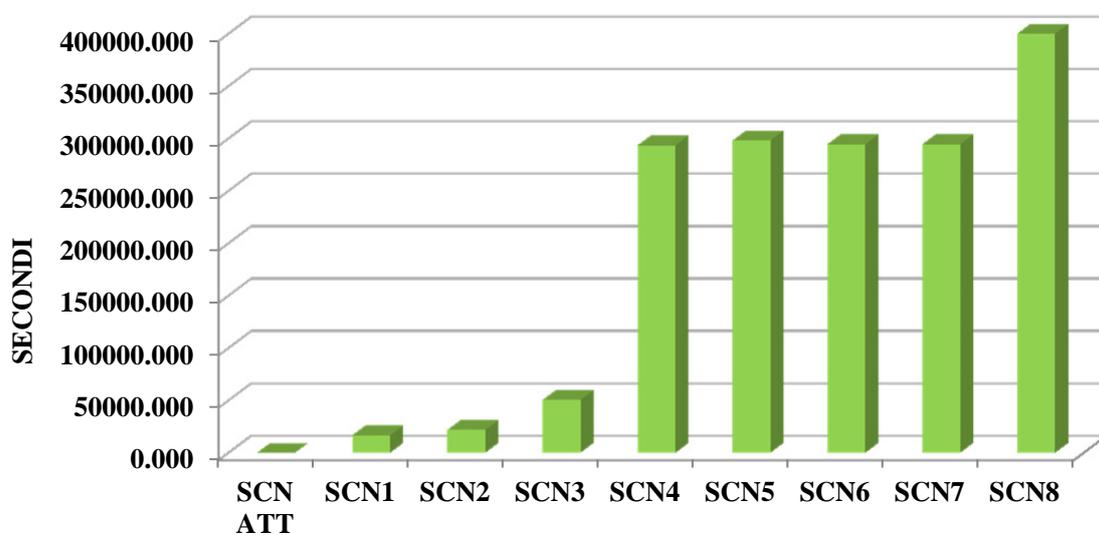


Figura 20 Istogramma che riporta il valore di NRI per ogni scenario

CHANG: PRESTAZIONI DELLA RETE

L'indicatore $D_{s,t}$ è stato calcolato sulla base dei percorsi di minima distanza. In questo caso la lunghezza di ciascun arco è stata modificata per tener conto della riduzione di capacità dei ponti, attraverso un fattore moltiplicativo F :

- capacità residua pari a 100% $F = 1$;
- capacità residua pari a 75% $F = 2$;
- capacità residua pari a 50% $F = 3$;
- capacità residua pari a 25% $F = 4$;
- capacità residua pari a 0% $F = 5$.

I risultati ottenuti sono riportati nella *Figura 21*. Ricordando che l'indicatore $D_{s,t}$ è pari 0 nel caso di completa chiusura della rete e 1 se non si ha nessun danno, l'ordinamento ottenuto rispecchia quello degli scenari in rapporto alla loro pericolosità.

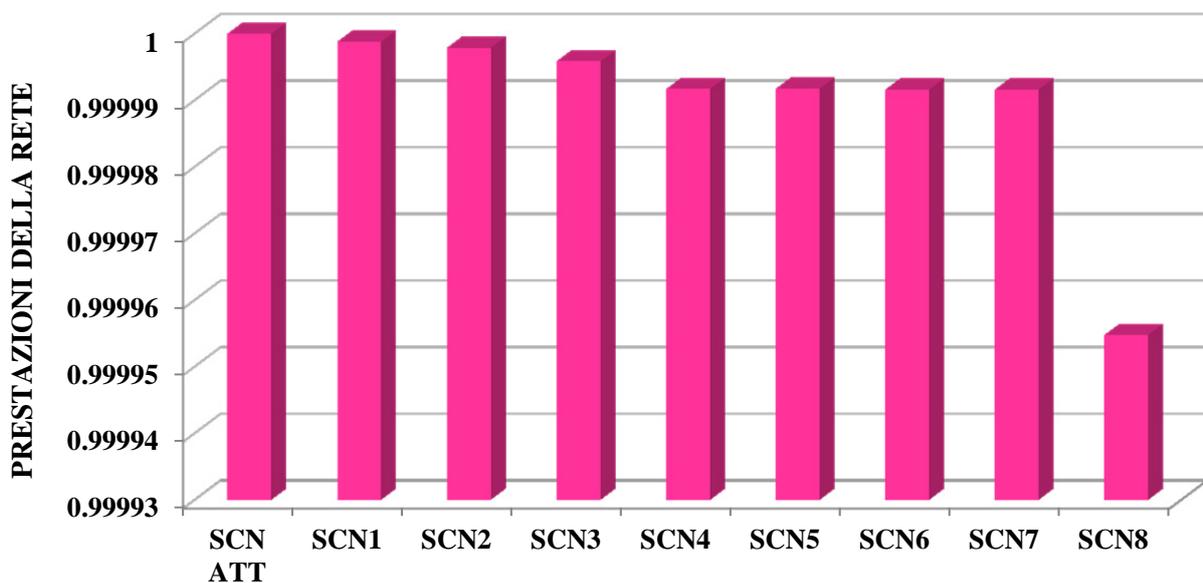


Figura 21 Istogramma che riporta il valore delle prestazioni della rete per ogni scenario

CHANG E NOJIMA: LUNGHEZZA DELLA RETE

L'indicatore è stato calcolato come somma della lunghezza della rete, nelle stesse ipotesi dell'indicatore di efficienza. Ai fini del computo dell'indicatore si sono considerati soltanto gli archi con una capacità residua post-sisma non inferiore al 75 % di quella iniziale. I risultati per i diversi scenari sismici sono riportati nella *Figura 22*.

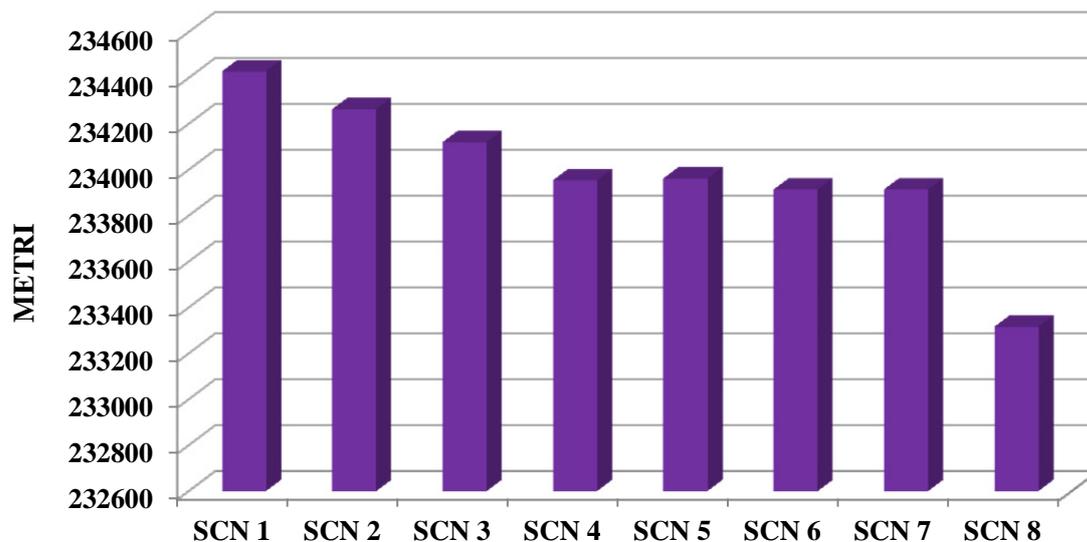


Figura 22 Istogramma che riporta il valore della lunghezza della rete per ogni scenario

7.2.3 *Analisi dei risultati – Confronto tra strategie di retrofitting*

Dopo aver valutato gli indicatori nei diversi scenari, ed aver osservato una corrispondenza nei risultati prodotti, si è proceduto all'individuazione della strategia di retrofitting ottimale, vincolata rispetto al budget disponibile, con riferimento ad uno specifico scenario sismico.

7.2.3.1 *Scenario sismico di riferimento e vincolo di budget*

Ai fini di questa analisi di dettaglio, è stato preso in considerazione lo scenario sismico 5, e con riferimento ad un precedente lavoro di tesi [95] è stato stabilito il budget di spesa per gli interventi di adeguamento sismico.

Più nello specifico, si sono identificati gli interventi preventivi sui ponti da adeguare, in modo da garantire l'evacuazione della cittadinanza in meno di 30 minuti. La *Tabella 21* mostra i ponti da sottoporre a interventi preventivi.

Bridges	Evacuation Time (min) Morning				
	30	60	90	120	150
10-230-P	0	0	0	0	0
10-232-P	1	0	0	0	0
10-240-P	0	0	0	0	0
10-241-P	1	0	0	0	0
10-243-P	0	0	0	0	0
10-246-P	1	0	0	0	0
10-254-P	0	0	0	0	0
10-271-P	1	0	0	0	0

Tabella 21 Ponti che devono essere adeguati per avere un'evacuazione in 30 minuti

La spesa prevista per questi interventi è pari a 81670.60 euro, da cui si è deciso di fissare il budget disponibile per gli ipotetici interventi di adeguamento pari a 82000 euro.

7.2.3.2 *Ipotesi di intervento preventivo*

Sulla base del budget a disposizione, sono state identificate 23 ipotesi di intervento, riportate sinteticamente in *Tabella 22*. Tra queste è stata inserita anche l'ipotesi "ottimale" ai fini dell'evacuazione, ed indicata come ipotesi 1.

IPOTESI	10-230-P	10-232-P	10-240-P	10-241-P	10-243-P	10-246-P	10-254-P	10-271-P	SPESA TOTALE
1		15.800,00		26.693,00		20.697,60		18.480,00	81670,6
2	9.400,00		43.982,40	26.693,00					80075,4
3	9.400,00		43.982,40				24.000,00		77382,4
4		15.800,00	43.982,40			20.697,60			80480
5	9.400,00		43.982,40			20.697,60			74080
6			43.982,40		19.000,00			18.480,00	81462,4
7		15.800,00	43.982,40		19.000,00				78782,4
8	9.400,00		43.982,40		19.000,00				72382,4
9		15.800,00	43.982,40					18.480,00	78262,4
10	9.400,00		43.982,40					18.480,00	71862,4
11	9.400,00	15.800,00	43.982,40						69182,4
12	9.400,00			26.693,00		20.697,60	24.000,00		80790,6
13	9.400,00			26.693,00	19.000,00		24.000,00		79093
14	9.400,00	15.800,00		26.693,00			24.000,00		75893
15	9.400,00			26.693,00	19.000,00	20.697,60			75790,6
16	9.400,00			26.693,00		20.697,60		18.480,00	75270,6
17	9.400,00	15.800,00		26.693,00		20.697,60			72590,6
18		15.800,00			19.000,00	20.697,60	24.000,00		79497,6
19	9.400,00				19.000,00	20.697,60	24.000,00		73097,6
20		15.800,00			19.000,00	20.697,60		18.480,00	73977,6
21	9.400,00				19.000,00	20.697,60		18.480,00	67577,6
22	9.400,00	15.800,00				20.697,60		18.480,00	64377,6
23	9.400,00	15.800,00			19.000,00			18.480,00	62680

Tabella 22 Ipotesi di intervento alternative con budget di 82000 euro

7.2.3.3 Calcolo degli indicatori di vulnerabilità

Gli indicatori di vulnerabilità sono stati ricalcolati per tutte le ipotesi di retrofitting con le stesse modalità descritte per gli scenari. Le Figura 24 Figura 25 Figura 26 Figura 27 Figura 28 Figura 29 riportano i valori degli indicatori calcolati per le ipotesi di intervento previste, con riferimento alla situazione iniziale pre-sisma.

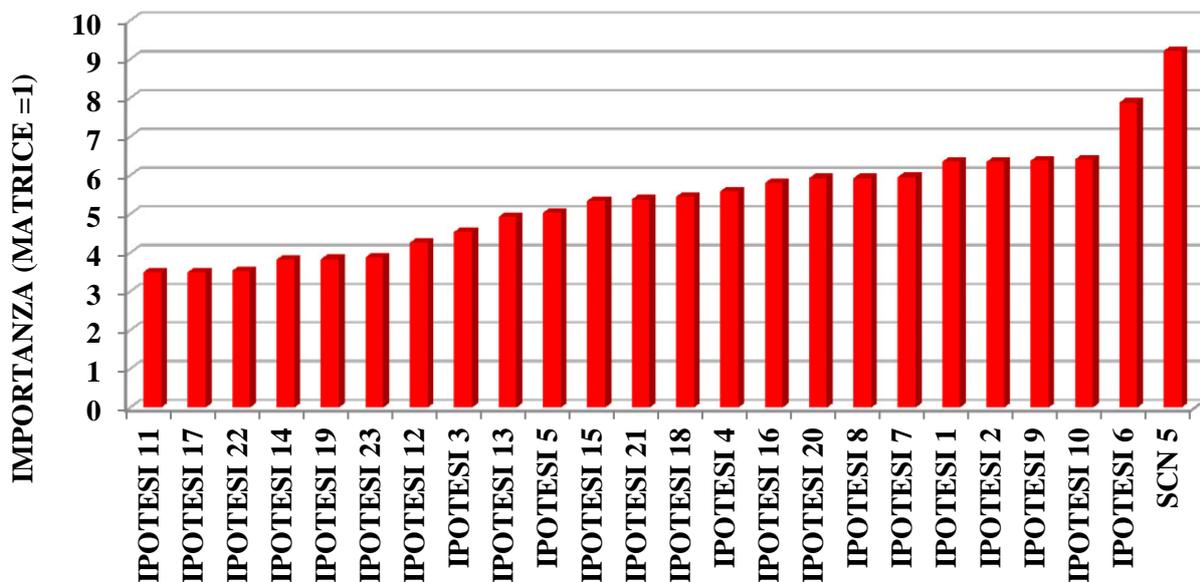


Figura 23 Istogramma che riporta il valore di importanza per ogni ipotesi (pesi pari a 1)

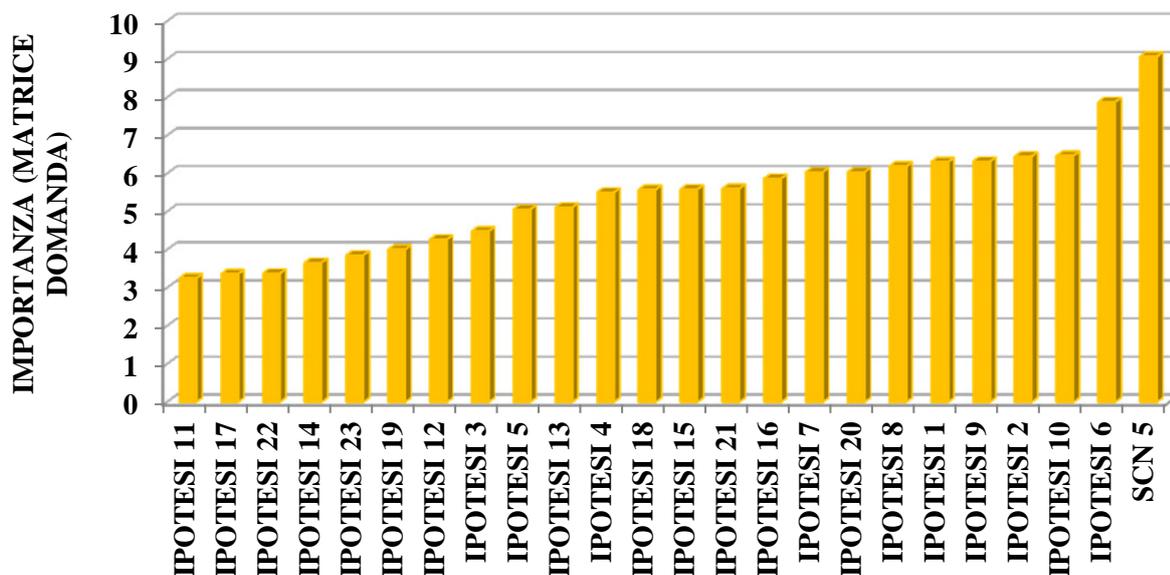


Figura 24 Istogramma che riporta il valore di importanza per ogni ipotesi (pesi pari alla domanda)

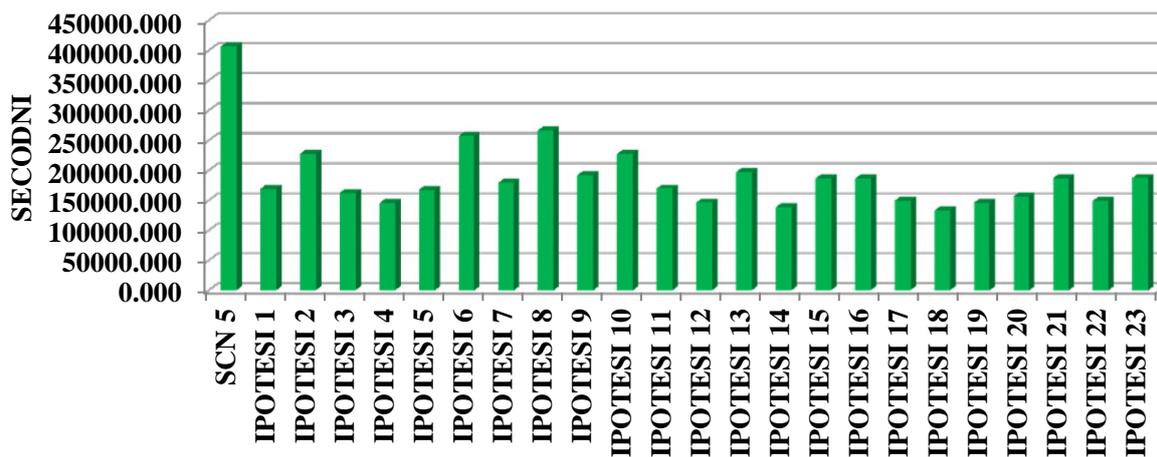


Figura 25 Istogramma che riporta il valore dell' efficienza per ogni ipotesi

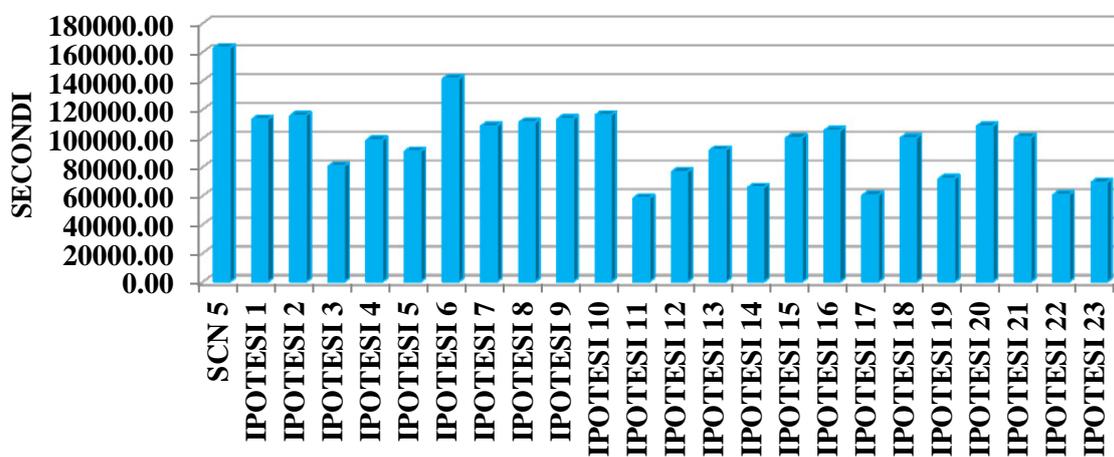


Figura 26 Istogramma che riporta il valore di vulnerabilità per ogni ipotesi

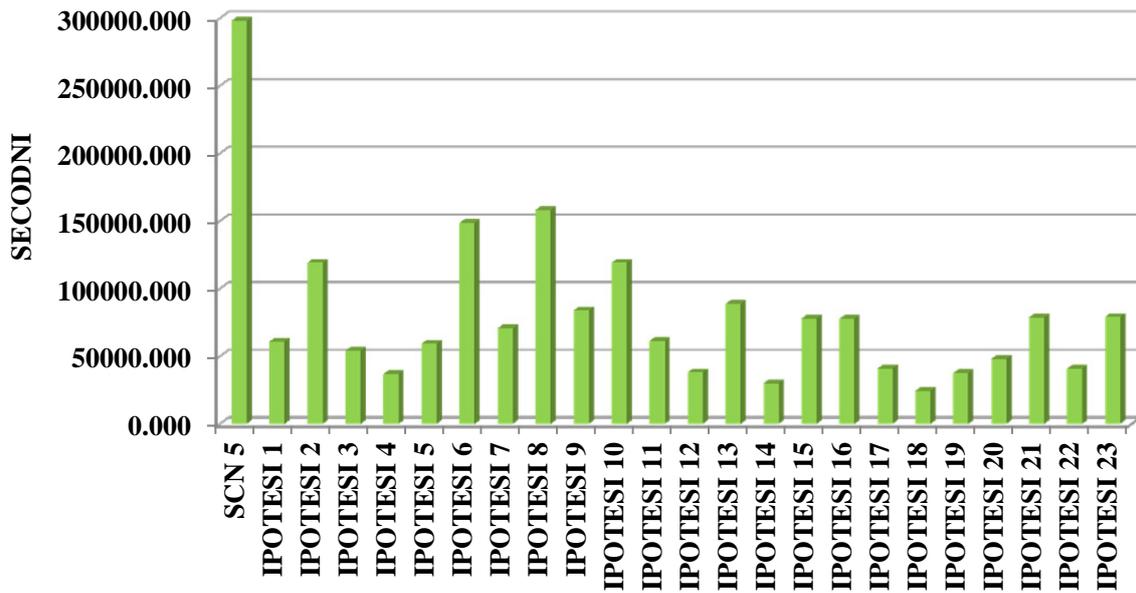


Figura 27 Istogramma che riporta il valore di NRI per ogni ipotesi

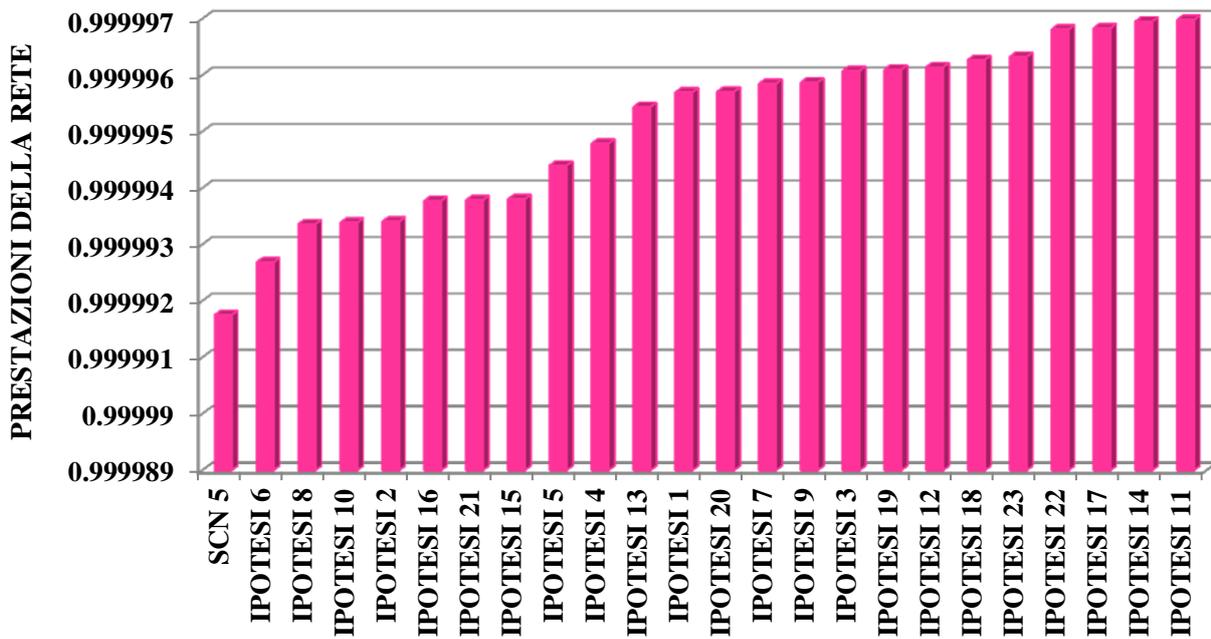


Figura 28 Istogramma che riporta il valore delle prestazioni della rete per ogni ipotesi

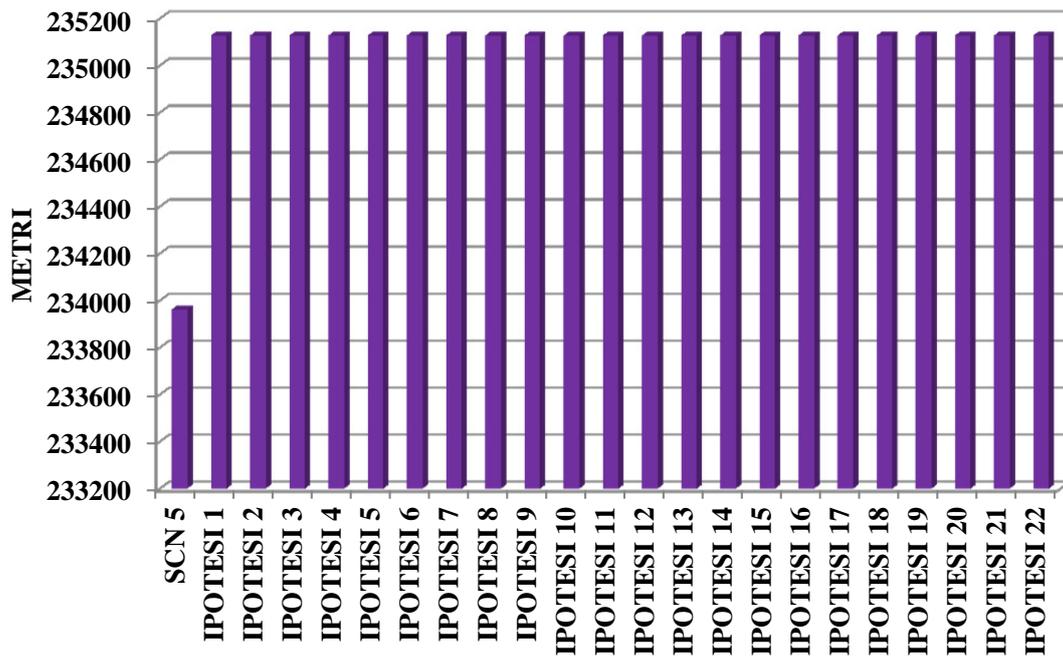


Figura 29 Istogramma che riporta il valore della lunghezza della rete per ogni ipotesi

La Tabella 23 riassume le prestazioni delle diverse ipotesi.

IPOTESI	IMPORTANZA (1)	IMPORTANZA	EFFICIENZA	VULNERABILITA'	NRI	CHANG	LUNGHEZZA RETE
1	19	19	11	19	11	13	-
2	20	21	20	21	20	20	-
3	8	8	9	8	9	9	-
4	14	11	3	11	3	15	-
5	10	9	10	9	10	16	-
6	23	23	22	23	22	23	-
7	18	16	13	16	13	11	-
8	17	18	23	18	23	22	-
9	21	20	18	20	18	10	-
10	22	22	21	22	21	21	-
11	1	1	12	1	12	1	-
12	7	7	5	7	5	7	-
13	9	10	19	10	19	14	-
14	4	4	2	4	2	2	-
15	11	13	15	13	15	17	-
16	15	15	14	15	14	19	-
17	2	2	6	2	6	3	-
18	13	12	1	12	1	6	-
19	5	6	4	6	4	8	-
20	16	17	8	17	8	12	-
21	12	14	16	14	16	18	-
22	3	3	7	3	7	4	-
23	6	5	17	5	17	5	-

Tabella 23 Tabella riassuntiva sulle prestazioni delle diverse ipotesi

Dall'osservazione dei risultati emergono alcune considerazioni di rilievo per quanto riguarda le prestazioni delle ipotesi di intervento e l'uso di questi indicatori:

- come previsto, le ipotesi di intervento presentano prestazioni migliori rispetto allo scenario privo di interventi e peggiori rispetto allo scenario pre-sisma;
- i diversi indicatori forniscono ordinamenti non perfettamente concordi tra loro (*Tabella 23*), tuttavia è possibile identificare alcuni risultati comuni di rilievo:
 - alcune ipotesi sono preferibili rispetto alle altre, indipendentemente dall'indicatore di vulnerabilità adottato (11, 14, 17);
 - sono chiaramente individuabili alcune ipotesi di intervento (6 e 8) da non implementare, in quanto produrrebbero miglioramenti marginali rispetto allo scenario in assenza di intervento;
 - l'ipotesi di intervento "ottimale" ai fini dell'evacuazione (ipotesi 1) non appartiene al gruppo delle alternative migliori, pur essendo un'ipotesi sicuramente migliorativa dello scenario in assenza di intervento.
- alcuni indicatori (lunghezza di rete) sono poco significativi per questo tipo di valutazione, poiché non emergono variazioni di rilievo tra le diverse ipotesi valutate.
- gli indicatori basati sulle prestazioni di rete (tempi di percorrenza), sono affini tra loro e portano a risultati simili.

Il fatto che la soluzione "ottimale" ai fini dell'evacuazione non sia tra le migliori anche in questa valutazione evidenzia come la decisione ottimale sugli interventi da approntare sia complessa e influenzata dal tipo di obiettivi che ci si pone di raggiungere. Un'analisi ulteriore delle ipotesi maggiormente significative potrebbe condurre all'individuazione di interventi comuni (es. miglioramento su uno stesso ponte) e quindi rafforzare la confidenza dei decisori sulla bontà delle azioni da intraprendere. Ancor più indicata potrebbe essere l'adozione di approcci multicriteriali, che permettano di esplicitare l'importanza associata dal decisore ai diversi obiettivi (evacuazione nell'immediato post-sisma, funzionalità nel medio periodo) e determinare ulteriori soluzioni di compromesso.

8 CONCLUSIONI

La presente tesi si è posta l'obiettivo di valutare lo stato dell'arte sul tema della vulnerabilità sismica delle reti stradali, con una specifica attenzione al tema delle misure di prestazione e degli indicatori di vulnerabilità. Basandosi sulla raccolta bibliografica descritta nella prima parte dell'elaborato, che ha evidenziato i diversi aspetti modellistici di rilievo in questo tipo di analisi, si è deciso di valutare la vulnerabilità sismica della rete stradale rispetto al caso-studio della città di Conegliano.

La prima analisi condotta è stata finalizzata a verificare che gli indicatori di vulnerabilità proposti fossero concordi nel valutare la vulnerabilità di una rete, nel senso di creare una gerarchia di scenari coerente alla pericolosità degli scenari stessi. Il confronto effettuato tra gli indicatori, calcolati rispetto agli 8 scenari sismici individuati, ha mostrato una sostanziale omogeneità nel fornire il corretto ordinamento in rapporto alla pericolosità.

Nella seconda analisi condotta si è valutato l'impiego degli stessi indicatori per l'individuazione della strategia di retrofitting ottimale, vincolata rispetto al budget disponibile, con riferimento ad uno specifico scenario sismico. L'analisi dei risultati ha fatto emergere alcune considerazioni di rilievo in rapporto all'uso di questi indicatori:

- prestazioni coerenti con i risultati attesi, migliori rispetto allo scenario privo di interventi e peggiori rispetto allo scenario pre-sisma;
- ordinamenti non perfettamente concordi tra i diversi indicatori, tuttavia:
 - sono state individuate alcune ipotesi chiaramente preferibili rispetto alle altre, indipendentemente dall'indicatore di vulnerabilità adottato (11, 14, 17);
 - sono state individuate alcune ipotesi di intervento (6 e 8) da non implementare, in quanto produrrebbero miglioramenti marginali rispetto allo scenario in assenza di intervento;
 - l'ipotesi di intervento indicata come "ottimale" ai fini dell'evacuazione della popolazione (1), non appartiene al gruppo delle alternative migliori, pur essendo un'ipotesi sicuramente migliorativa dello scenario in assenza di intervento.

- non-significatività di alcuni indicatori (lunghezza di rete), in quanto poco sensibili alle variazioni presenti tra le diverse ipotesi valutate, e affinità marcata tra gli indicatori basati sulle prestazioni di rete (tempi di percorrenza).

In riferimento allo studio dell'accessibilità eseguito è quindi possibile affermare che gli indicatori scelti per l'analisi forniscono risultati simili, mostrando una coerenza sostanziale nel definire gli elementi di criticità e di forza presenti nel territorio.

La mancanza di coerenza con la soluzione ottimale individuata rispetto ad altri obiettivi (evacuazione della popolazione), fornisce lo spunto per lo sviluppo di procedure di valutazione di tipo multicriteriale, che permettano di esplicitare l'importanza associata dal decisore ai diversi obiettivi e determinare specifiche soluzioni di compromesso.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] E. Treccani, «Definizione di rischio,» [Online]. Available: www.treccani.it/vocabolario/rischio. [Consultato il giorno 26 Giugno 2014].
- [2] P. d. C. d. M. -. D. d. P. Civile, «Sito web Protezione Civile,» [Online]. Available: <http://www.protezionecivile.gov.it/>. [Consultato il giorno 27 Giugno 2014].
- [3] D. MELIS, *Sviluppo di una metodologia per la valutazione della vulnerabilità sismica di una rete stradale*, Tesi di Dottorato in Ingegneria del Territorio - XX Ciclo, 2007.
- [4] S. L. CUTTER, J. T. MICHELL e M. S. SCOTT, «Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina,» *Annals of the Association of American Geographers*, n. 11, pp. 713-737, 2000.
- [5] G. TESORIERE, *Strade ferrovie e Aeroporti - VOL. II opere in terra e soprastrutture*, Torino: UTET, 1984.
- [6] A. D'ANDREA, A. CONDORELLI, G. BIONDI, S. CAFISO, F. COLOMBRITA, R. COLOMBITA, M. MAUGERI e G. MUSSUMECI, «Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie,» World road association, 2006.
- [7] J. HUSDAL, «2nd International Symposium on Transportation Network Reliability,» in *Reliability and vulnerability versus cost and benefits - p. 180-186*, Queeston and Christchurch, New Zealand, 2004.
- [8] K. BERDICA, «An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done,» *transport Policy*, n. 9, pp. 117-127, 2002.
- [9] A. BLEUKX, J. STADA e B. IMMERS, «3rd International SIIV Congress "People, Land, Environment and Transpor Infrastructures - Reliability and development (Session C1 "Network reliability),» in *The effect of network layout on the reliability of travel time*, Bari, 2005.
- [10] M. A. P. TAYLOR e G. M. D'ESTE, «2nd International Symposium on Transportation Network Reliability,» in *Critical infrastruictiure and transport network vulnerability: develloping a method for diagnosis and assessment - p. 96-102*, Queeston and Christchurch,

New Zealand, 2003.

- [11] E. JENELIUS e L. MATTSSON, «Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study,» 2009.
- [12] A. GORETTI e V. SARLI, «Road Network and Damaged Buildings,» *Bulletin of Earthquake Engineering*, n. 4, p. 159–175, 2003.
- [13] L. CHANG, *Transportation system modeling and applications in earthquake engineering*, Urbana, Illinois: PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [14] E. JENELIUS e L. MATTSSON, «1st Seminar Nectar Cluster, Molde University College,» in *Developing a methodology for a road network vulnerability analysis*, Molde (Norway), 2006.
- [15] E. JENELIUS e L. MATTSSON, «Importance and exposure in road network vulnerability analysis,» *Transportation Research part A*, n. 40, pp. 537-560, 2006.
- [16] E. JENELIUS, «Considering the user inequity of road network vulnerability,» *Journal of Transport and Land Use*, 2010.
- [17] E. JENELIUS, «The Third International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR),» in *Incorporating Dynamics and Information in a Consequence Model for Road Network Vulnerability Analysis*, The Hague, The Netherlands, 2007.
- [18] E. JENELIUS, «Network structure and travel patterns explaining the geographical disparities of road network vulnerability,» *Journal of Transport Geography*, n. 17, pp. 234-244, 2009.
- [19] M. A. P. TAYLOR, S. V. C. SEKHAR e G. M. D'ESTE, «Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks,» *Netw Spat Econ*, n. 6, pp. 267-291, 2006.
- [20] N. NOJIMA, «The 3rd China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering,» in *Prioritization in upgrading seismic performance of road network based on system reliability analysis*, Kunming, China, 1998.
- [21] Y. CHEN e G. TZENG, «A fuzzy multi-objective model for reconstructing the postquake road-network by genetic algorithm,» *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 1, n. 2, pp. 85-95,

1999.

- [22] S. E. CHANG e N. NOJIMA, «The 6th National Conference on Earthquake Engineering,» in *Measuring Lifeline System Performance: Highway Transportation Systems in Recent Earthquakes*, 1998.
- [23] L. ISSACHAROFF, S. LAMMER, V. ROSATO e D. HELBING, «Critical infrastructures vulnerability: the highway networks».
- [24] J. SOHN, «Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach,» *Transportation Research Part A*, n. 40, pp. 491-506, 2006.
- [25] D. M. SCOTT, D. C. NOVAK, L. AULTMAN-HALL e F. GUO, «A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks,» *Journal of transport Geography*, n. 14, 2004.
- [26] A. K. RATHI e R. S. SOLANKI, «Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference,» in *Simulation of traffic flow during emergency evacuations: A microcomputer based modeling system*, Los Alamitos, CA, 1993.
- [27] (ORNL), Oak Ridge National Laboratory, «Responding to energy-related emergencies,» *ORNL Review*, vol. 35, n. 2, pp. 21-23, 2002.
- [28] E. C. CHANG, «Traffic simulation for effective emergency evacuation,» Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2003.
- [29] K. D. MORIARTY, D. NI e J. COLLURA, «Transportation Research Board 2007 Annual Meeting,» in *Modeling Traffic Flow under emergency evacuation situations: Current practice and future directions*, Washington, D.C, 2007.
- [30] B. MEI, *Development of trip generation models of hurricane evacuation*, Baton Rouge, LA: Master Thesis, Louisiana State University, 2002.
- [31] S. A. ARDEKANI, «A decision tool for transportation operations following urban disasters,» Final Report to Earthquake Hazard Mitigation Program, National Science Foundation (Grant No. BCS-9005042) Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington,

Arlington, Texas, 1992.

- [32] M. SHINOZUKA, Y. ZHOU, S. H. KIM, Y. MURACHI, S. BANERJEE, S. CHO e H. CHUNG, «Socio-economic effect of seismic retrofit implemented on bridges in the Los Angeles highway network,» Report No. CA F/CA/SD-2005/03, California Department of Transportation, Sacramento, CA, 2005.
- [33] H. WAKABAYASHI e H. KAMEDA, «The 5th US-Japan Workshop in Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems,» in *Network performance of highway systems under earthquake effects: A case study of the 1989 Loma Prieta earthquake*, Tsukuba Science City, Japan, 1992.
- [34] N. NOJIMA e M. SUGITO, «Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering,» in *Simulation and evaluation of post-earthquake functional performance of transportation network*, Wellington, New Zealand, 2000.
- [35] Y. FAN, «Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Year 9 Report,» PEER, Berkeley, California, 2006.
- [36] A. S. KIREMIDJIAN, J. E. MOORE, Y. FAN, O. YAZLALI, N. BASOZ e M. WILLIAMS, «Seismic risk assessment of transportation network systems,» *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 11, n. 3, pp. 371-382, 2007.
- [37] Y. S. KIM, *Personal communication, ResearchScientist, EQECAT*, Oakland, CA, 2009.
- [38] A. CHATTERJEE e M. M. VENIGALLA, "Travel demand forecasting for urban transportation planning" *Handbook of Transportation Engineering*, New York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- [39] Y. FAN, *Optimal routing through stochastic networks*, California: Ph.D. Dissertation, University of Southern California, 2003.
- [40] S. D. WERNER, C. E. TAYLOR, S. CHO, J. LAVOIC, C. HUYCK, C. EITZEL, H. CHUNG e R. EGUCHI, «Methodology and software for seismic riskanalysis of highway systems,» Special Report No. MCEER-06-SP08, MCEER, University of Buffalo, Buffalo, NY, 2006.

-
- [41] H. LU, *Theory and method in transportation planning*, Beijing, China: Tsinghua University Press, 2006.
- [42] R. DESROCHES, *Personal communication, Associate Professor of Civil and Environmental Engineering*, Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology , 2008.
- [43] H. HWANG e J. W. JAW, «Probabilistic damage analysis of structures,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 116, n. 7, pp. 1992-2007, 1990.
- [44] M. SHINOZUKA, Y. MURACHI, X. DONG, Y. ZHOU e M. J. ORLIKOWSKI, «"Effect of seismic retrofit of bridges on transportation networks" Research Progress and Accomplishments (2001-2003),» Report No. MCEER-03-SP-01, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER) University of Buffalo, Buffalo, NY, 2003.
- [45] F. YAMAZAKI, T. HAMADA, H. MOTOYAMA e H. YAMAUCHI, «Earthquake damage assessment of expressway bridges in Japan,» in *Proceedings of the 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, Seattle, WA, 1999.
- [46] J. E. PADGETT e R. DESROCHES, «Retrofitted bridge fragility analysis for typical classes of multi-span bridges,» *Earthquake Spectra*, vol. 23, n. 1, pp. 115-130, 2007.
- [47] R. ROSSI, M. GASTALDI, F. CARTURAN, C. PELLEGRINO e C. MODENA, «Planning and management of actions on transportation system to address extraordinary events in post - emergency situations. A multidisciplinary approach,» *Trasporti Europei*, vol. 51, n. 2, 2012.
- [48] P. ROSSI, *GESTIONE DELL'EMERGENZA SISMICA IN SISTEMI A RETE*, PADOVA: TESI DI LAUREA, 2014.
- [49] G. SCHUCHMANN, «Road network vulnerability–evaluation of measures in ranking damages and developments,» *periodica polytechnica*, vol. 54, n. 1, pp. 61-65, 2010.
- [50] K. BERDICA e J. ELIASSON, «2nd International Symposium on Transportation Network Reliability,» in *Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective*, Queeston and Christchurch, New Zealand, 2004.
- [51] T. KIM, J. H. HAM e D. E. BOYCE, «Economic impacts of transportation network changes: Implementation of a combined transportation network and input-output model,» *Papers in*

Regional Science, n. 81, pp. 223-246, 2002.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento va al mio relatore il Prof. Massimiliano Gastaldi che con la costante disponibilità e utili indicazioni mi ha supportata e indirizzata durante questo lavoro di tesi.

Un particolare ringraziamento va anche al mio correlatore, l'Ing. Gregorio Gecchele , per la sua pazienza e per tutto l'aiuto fornitomi durante la stesura di questa tesi.

Un ringraziamento ai miei amici e a tutte le persone che ho incontrato negli anni universitari che mi hanno incoraggiata durante questo percorso.

Non posso non citare i miei genitori, i quali mi hanno sempre sostenuta durante questi anni universitari, sia economicamente che moralmente dandomi la forza di andare avanti; e mia sorella Ilaria che con la sua allegria è riuscita a non farmi mai mancare il sorriso.

Ed infine un ringraziamento ad Alberto, il mio fidanzato, il mio amico, la persona più mi ha aiutata durante questo cammino non sempre fatto di momenti felici, standomi costantemente accanto.