UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile

Valutazioni statistiche sulla classificazione del rischio per un campione di ponti secondo le nuove linee guida

Statistical evaluations on the risk classification for a sample of bridges in accordance with the new guidelines

Relatore:

Prof. Fabrizio Gara

Correlatore:

Prof. Sandro Carbonari

Tesi di Laurea di:

Luca Tentella

A.A. 2020 / 2021

Indice

Introduzione **1**

Capitolo 1 - Il tema della gestione di ponti e viadotti esistenti: aspetti generali e inquadramento normativo **3**

1.1 Cenni introduttivi sulle cause del problema della gestione delle opere **3**

1.1.1 Variabilità delle caratteristiche strutturali e frammentazione della gestione 3

1.1.2 Età delle opere 4

1.1.3 Cambiamento delle azioni da traffico e sismiche 5

1.1.4 Condizioni idrogeologiche 6

1.2 Alcuni esempi di crolli strutturali nei ponti italiani **6**

1.2.1 Crollo del viadotto Petrulla 8

1.2.2 Crollo del cavalcavia ad Annone 9

1.2.3 Crollo del cavalcavia sull'A14 10

1.2.4 Crollo del ponte di Fossano 11

1.2.5 Crollo del ponte "Morandi" 12

1.2.6 Crollo del ponte di Caprigliola 14

1.3 Quadro normativo in materia di ispezione, manutenzione e monitoraggio dei ponti **15**

1.4 Le nuove Linee Guida **18**

1.4.1 Livello 0 20

1.4.2 Livello 1 21

1.4.3 Livello 2 23

1.4.4 Le ispezioni sulle opere 25

Capitolo 2 - Elaborazione statistica dei dati raccolti sul campione di ponti esaminato **27**

2.1 Livello 0 ..... **27**

2.2 Livello 2 ..... **34**

2.2.1 Pericolosità strutturale e fondazionale 35
2.2.2 Vulnerabilità strutturale e fondazionale 38
2.2.3 Esposizione strutturale e fondazionale 46
2.2.4 Classe di attenzione strutturale e fondazionale 52
2.2.5 Pericolosità sismica 55
2.2.6 Vulnerabilità sismica 60
2.2.7 Esposizione sismica 64
2.2.8 Classe di attenzione sismica 67
2.3 Valutazione della classe di attenzione globale e considerazioni statistiche dei risultati 69

Capitolo 3 - Definizione dettagliata della classe di attenzione per alcuni ponti appartenenti al campione 74

3.1 Localizzazione e censimento delle opere 74
3.1.1 Informazioni generali opera 1 76
3.1.2 Informazioni generali opera 8 77
3.1.3 Informazioni generali opera 15 79
3.1.4 Informazioni generali opera 55 81
3.1.5 Informazioni generali opera 67 83
3.1.6 Informazioni generali opera 74 85
3.2 Ispezioni e valutazione del livello di difettosità 88
3.2.1 Analisi della difettosità dell'opera 1 89
3.2.2 Analisi della difettosità dell'opera 8 91
3.2.3 Analisi della difettosità dell'opera 15 94
3.2.4 Analisi delle difettosità dell'opera 55 95
3.2.5 Analisi delle difettosità dell'opera 67 97
3.2.6 Analisi della difettosità dell'opera 74 99
3.3 Definizione della classe di attenzione 101
3.3.1 Definizione della pericolosità strutturale e fondazionale 101
3.3.2 Definizione della vulnerabilità strutturale e fondazionale 103

3.3.3 Definizione dell'esposizione strutturale e fondazionale 105
3.3.4 Definizione della classe di attenzione strutturale e fondazionale..... 107
3.3.5 Definizione della pericolosità sismica 109
3.3.6 Definizione della vulnerabilità sismica 110
3.3.7 Definizione dell'esposizione sismica 112
3.3.8 Definizione della classe di attenzione sismica 114
3.4 Considerazioni finali e stima della classe di attenzione complessiva 115

Conclusioni 118

Allegati 121

Bibliografia e sitografia 127

Introduzione

La sicurezza dei ponti e viadotti esistenti è certamente una tematica di cui si è molto discusso negli ultimi anni. In particolare, ad accentuarne la rilevanza sono stati i numerosi crolli strutturali che si sono susseguiti nel tempo, fra i quali, la nota vicenda che ha visto come protagonista il Ponte "Morandi". L'età e la variabilità delle caratteristiche strutturali delle opere, la frammentazione delle competenze, i cambiamenti, nel corso degli anni, delle azioni da traffico e sismiche ed un territorio fragile dal punto di vista idrogeologico, sono le principali problematiche che si possono riscontrare in relazione allo stato di sicurezza dei ponti e viadotti italiani. Tuttavia, essendo tali questioni già note da tempo, a partire dal 1967 sono state emanate diverse normative con lo scopo di definire i criteri generali per la gestione delle opere esistenti. D'altra parte, queste, non sono state molto efficaci, in particolare per la difficoltà nello svolgere verifiche dettagliate su tutte le strutture; per cui, con lo spirito di semplificare la gestione delle opere e di favorire un approccio di tipo preventivo, nel 2020 sono state approvate le "*Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*". L'innovazione di tali direttive, sfruttando un metodo basato su più livelli di valutazione, consiste nell'utilizzo della classificazione del rischio quale discriminante per decidere su quali opere si deve procedere ad una valutazione dettagliata della sicurezza e su quali invece, considerate meno critiche, non si necessita immediatamente di tali verifiche. La classificazione del rischio, secondo le nuove Linee Guida, segue una struttura piramidale in cui il rischio globale è suddiviso in tre parti: quella strutturale e fondazionale, quella sismica e quella idraulica e frane. Ognuna di esse, inoltre, è composta dalle relative classi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Combinando, quindi, tutti gli elementi è possibile ottenere il rischio complessivo attribuibile ad una singola opera. Sempre sulla base del livello di rischio, le nuove direttive stabiliscono, per ogni ponte, le modalità e le tempistiche che devono essere adottate per le ispezioni successive.

Il presente lavoro intende mostrare un'applicazione del metodo proposto dalle nuove Linee Guida fino al raggiungimento della classe di rischio strutturale e sismica, soffermandosi infine sull'analisi statistica dei risultati pervenuti. A tal scopo, lo studio è

stato condotto su un campione composto da 75 opere fra ponti e viadotti, tutti appartenenti alle reti stradali che si sviluppano sull'intero territorio marchigiano. Nel primo passo del metodo, ossia il censimento, le opere del campione sono state geolocalizzate e, grazie allo studio della documentazione reperita e di sopralluoghi in sito, sono state ottenute le informazioni da utilizzare per raggiungere la classe di rischio. Successivamente, le Linee Guida prevedono la definizione dello stato di degrado delle opere tramite apposite ispezioni. In questo caso, tali ispezioni non sono state svolte su tutti i ponti studiati, pertanto, si è proceduto considerando tale parametro incognito in tutti i casi. Ottenute le informazioni necessarie ed ipotizzate quelle non note, sono state stimate le probabilità di accadimento delle classi di rischio per ogni opera seguendo le indicazioni riportate nelle Linee Guida. In questa fase, inoltre, sono state svolte alcune valutazioni statistiche relativamente ai parametri utilizzati per pervenire alla classificazione del rischio, al fine di evidenziare le principali caratteristiche delle opere che compongono il campione esaminato.

Infine, per sei dei ponti appartenenti allo stesso campione, si è passati alla definizione esatta della classe di rischio strutturale e sismica, avendo a disposizione, per questi, i dati delle ispezioni che ne individuano lo stato di degrado. Come è stato specificato in precedenza per tutti ponti del campione, il punto di partenza è il censimento delle sei opere ma in questo caso vengono riportate, in aggiunta, alcune informazioni generali sulle loro caratteristiche. In seguito, sulla base dei dati raccolti durante le ispezioni, vengono descritti nello specifico lo stato di conservazione in cui versano le opere e le principali forme di degrado individuate. A questo punto, non essendo più incognito il livello di difettosità delle sei opere, è stato possibile definire espressamente, tramite percorsi grafici, le modalità in cui i parametri si combinano fra loro fino al raggiungimento della classe di rischio. In ultimo, i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti in precedenza con lo scopo di valutare la corrispondenza fra le classi di rischio dettagliate e le loro probabilità di accadimento.

Capitolo 1
Il tema della gestione di ponti e viadotti esistenti: aspetti generali e inquadramento normativo

1.1 Cenni introduttivi sulle cause del problema della gestione delle opere

Prendendo a riferimento i frequenti casi di crolli strutturali o dissesti che si sono verificati fino ad oggi, appare evidente il limitato stato di sicurezza in cui versano i ponti e viadotti italiani. Nel seguito, quindi, vengono descritte nel dettaglio quelle che si ritengono essere le principali problematiche connesse alle difficoltà della gestione delle opere esistenti.

1.1.1 Variabilità delle caratteristiche strutturali e frammentazione della gestione

Nel corso delle epoche storiche durante le quali queste opere sono state realizzate, si sono susseguiti diversi metodi costruttivi che rendono il patrimonio attuale molto vario. Opere in muratura, in c.a., in c.a.p., in misto acciaio/calcestruzzo, sono associate a dimensioni e schemi statici differenti e specifici per ogni materiale. Considerate queste diversità è evidente che non sia possibile definire un unico metodo di indagine, ma si dovrà altresì valutare caso per caso quali siano gli elementi critici o meno su cui soffermarsi in fase di ispezione.

A tutto ciò si aggiunge una rete infrastrutturale frammentata in termini di competenze; nel 2020 si stimava che il 45% dei ponti fosse in mano ad ANAS Spa, il 20% gestito da concessionari stradali e autostradali, mentre il restante 35% rientrava nelle competenze di piccoli enti locali quali regioni, provincie e comuni (Frizzarin M., Leonardi A., Franchetti P., 2020). Tali stime sono cambiate inevitabilmente in seguito al piano "Rientro strade", mirato a migliorare la realtà gestionale delle opere infrastrutturali italiane. Il piano, avviato in una prima fase nel 2018 da ANAS di concerto con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e conclusosi nel 2021, prevedeva il trasferimento di

circa 6.500 km di strade di ex competenza regionale, provinciale e comunale e con essi sono stati aggiunti alle competenze ANAS altre 2.900 opere fra ponti e viadotti (ANAS Spa, 2021).

È chiaro che questa frammentazione genera difficoltà in materia di gestione delle opere con il risultato che spesso gli enti hanno conoscenze molto poco approfondite delle stesse, situazione ulteriormente aggravata anche dalla documentazione a volte carente ed incompleta. Anche la manutenzione risente di tale contesto poiché gli enti più piccoli avranno sicuramente fondi molto contenuti da investire nei vari interventi necessari alle opere.

1.1.2 Età delle opere

Gran parte dei ponti e viadotti esistenti risale al secondo dopoguerra, momento in cui è avvenuta la ricostruzione delle opere distrutte durante il conflitto mondiale. Successivamente, la fase di sviluppo economico, industriale e sociale italiana degli anni Sessanta, segnò un importante incremento del traffico veicolare e quindi una crescita del tessuto stradale e delle opere di scavalco annesse. Se si considera che la vita utile di un ponte è di circa 50 ± 20 anni (Malerba, 2017), si intuisce anche che molte delle infrastrutture esistenti si stiano avviando verso la fine della propria; ciò non significa che esse non saranno in grado di svolgere ancora le loro funzioni, ma lo possono essere a condizioni modificate ovvero con livelli di sicurezza sicuramente ridotti (DeMiranda, 2019).

Va sottolineato che queste opere, frequentemente realizzate in c.a. o in c.a.p., sono state costruite in un periodo storico in cui il concetto di durabilità del materiale non era tenuto in debita considerazione, operando secondo la convinzione che il calcestruzzo non fosse soggetto a tali problematiche (N. Di Stefano, E. Faccin, S.G. Mantelli, F. Minelli, 2021). Infatti, i concetti di durabilità del materiale sono stati formalizzati con adeguati Codici di Pratica soltanto negli anni ’90 (DeMiranda, 2019).

1.1.3 Cambiamento delle azioni da traffico e sismiche

Durante l'epoca romana, così come nel medioevo, i ponti venivano realizzati in pietra secondo la tecnologia ad arco, l'unica in grado di mantenere la struttura in uno stato di sola compressione; quindi, l'azione più importate che il ponte doveva sostenere era il peso proprio, mettendo in secondo piano le azioni da traffico che erano perciò irrilevanti rispetto alle precedenti, cosa vera ancora oggi per quelle opere illese a noi pervenute. Agli inizi del '900 entrò nel mondo delle strutture il calcestruzzo, questo materiale era più resistente rispetto a quelli precedentemente utilizzati e abbinato con un'armatura in acciaio era in grado di far fronte anche alle sollecitazioni di trazione. In questo modo le tipologie strutturali cambiarono privilegiando opere con forme sempre più snelle e quindi con pesi propri minori, mentre le azioni accidentali assumevano un ruolo centrale (G. Buratti, A. Cosentino, F. Morelli, W. Salvatore, P. Bencivenga, M. Zizi, G. DeMatteis, 2019).

Inizialmente le azioni da traffico non erano definite in alcun modo, lasciandole integralmente alle considerazioni del progettista. Nel 1933, più precisamente il 15 settembre, furono emanate le prime normative su tali carichi, con l'approvazione della Normale n.8 "Carichi da considerare nel calcolo dei ponti per strade ordinarie". Successivamente, circa una volta ogni dieci anni, queste normative sono state aggiornate per far fronte al cambiamento, nel tempo, del traffico veicolare, che ha subito variazioni sia nella composizione, con un aumento generale del transito di mezzi leggeri e pesanti, che nella dimensione dei mezzi stessi, divenuti complessivamente più grandi (G. Buratti, A. Cosentino, F. Morelli, W. Salvatore, P. Bencivenga, M. Zizi, G. DeMatteis, 2019).

Considerazioni analoghe possono essere fatte anche dal punto di vista sismico. A seguito dei terremoti di Messina e Reggio Calabria del 1908, vennero identificate le prime zone sismiche in Italia, mediante lo strumento del regio decreto, che istituì una mappa in cui erano catalogati tutti i comuni interessati da importanti eventi sismici e per i quali vigeva l'obbligo di costruire considerando tali azioni. Nel 1974, l'ingresso di nuove normative tecniche in materia, aggiornò le modalità di inserimento dei comuni nella suddetta mappa definendo inoltre più specifiche condizioni per le verifiche ma lasciando invariato l'assetto di base, per cui in tutti i comuni non ricadenti in tali zone non vi era alcun obbligo

di costruire in maniera antisismica. Soltanto con l'ordinanza n. 3274 del 2003 l'intero territorio italiano venne considerato interamente sismico cosicché tutte le opere dovevano essere progettate nei confronti di accelerazioni sismiche definite in funzione della zona in cui esse sarebbero dovute sorgere. Va precisato inoltre che, sebbene esistessero già dal 1908 delle normative in materia sismica, le azioni previste erano comunque molto più basse rispetto a quelle definite nelle ultime normative tecniche (NTC 2018), pertanto anche i ponti costruiti in passato con questi accorgimenti potrebbero risultare ad oggi non idonei.

1.1.4 Condizioni idrogeologiche

Va aggiunto a quanto già detto che il territorio nazionale è particolarmente fragile dal punto di vista idrogeologico e i dissesti derivanti possono essere non rare cause di danneggiamenti o crolli delle opere infrastrutturali interferenti. Per quanto riguarda le frane, il rapporto ISPRA del 2018 sulla base dei dati dell'inventario IFFI, indicava che il 19,9 % del territorio italiano era a rischio frana, e di questo l'8,4 % veniva considerato come area a rischio da elevato a molto elevato, secondo la classificazione ideata dall'Istituto stesso (ISPRA, 2018). È comunque opportuno considerare che dal rapporto ISPRA del 2015 a quello del 2018, globalmente, le aree definite a rischio frana sono aumentate (91% dei comuni nel 2018 rispetto al 88% del 2015) (SNPA, 2019), per cui ad oggi questi dati potrebbero essere cambiati ulteriormente.

Per le alluvioni, nel 2018 si stimava che il 4,1% del territorio italiano era in uno scenario a pericolosità elevata, l'8,4% nello scenario medio e il 10,9% in quello basso (ISPRA, 2018); ad oggi questi numeri sono cambiati, rispettivamente, in 5,4%, 10% e 14% (ISPRA, 2021). Come per le frane si può notare che i dati sulla pericolosità sono in aumento.

1.2 Alcuni esempi di crolli strutturali nei ponti italiani

È interessante, per completezza di informazione circa l'oggetto dell'indagine effettuata, soffermarsi sulla delicata tematica del crollo dei ponti in Italia. Se si citano soltanto le opere di importanza più elevata, sono più di dieci, dal 2000 ad oggi, quelle che hanno

subito dei crolli. Le cause sono varie ed è possibile fare una distinzione fra le strutture che collassano in tempi brevi rispetto a quelle che incontrano tali circostanze soltanto dopo 20 o 30 anni. Nel primo caso si potrebbe parlare ad esempio, in linea generale, di errori progettuali o in fase costruttiva, oppure anche di problemi legati alla parte geotecnica, che sono comunque tutte situazioni che si manifestano durante i primi anni di vita dell'opera. Nel secondo caso invece, più spesso, i danni derivano da incrementi dei carichi sull'infrastruttura e dall'eccessiva situazione di degrado in cui essa versa, situazione aggravata non raramente da carenze manutentive (Reggio, 2018).

Le conseguenze del crollo di un ponte o viadotto sono generalmente legate all'importanza che l'opera riveste all'interno della rete stradale; questo significa però che un'opera più rilevante ha sicuramente conseguenze potenzialmente più gravi. Il danno più importante, di certo, è la perdita di vite umane o comunque la presenza di feriti; in secondo luogo, gli effetti del crollo si ripercuotono inevitabilmente sulla viabilità, e di conseguenza anche sull'economia dato che queste opere sono protagoniste nel tracciamento di percorsi di traffico più brevi e semplici, e la loro mancanza genera a tutti gli effetti un rallentamento del deflusso veicolare.

Questi eventi hanno senz'altro messo in luce delle problematiche comuni in tutto il territorio italiano e, di certo, sensibilizzato i vari enti gestori delle opere sui temi del controllo, manutenzione e monitoraggio. Soltanto a seguito del crollo del ponte sul Polcevera, caso che fra tutti ha avuto ovviamente un maggiore risalto mediatico, la presa di coscienza sullo stato delle opere infrastrutturali italiane ha subito rapidi progressi, portando infine, con il D.L. n. 109 del 28 settembre 2018, all'istituzione dell'ANSFISA e alla creazione dell'AINOP. L'ANSFISA (Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali), aggiornata dalla precedente ANSF, fermo restando quelli che sono gli obblighi e le responsabilità degli enti gestori, svolge attività a carattere tecnico-operativo, promuove ed assicura la vigilanza sulle condizioni di sicurezza del sistema ferroviario e delle infrastrutture appartenenti alla rete stradale (ANSFISA, 2021). L'AINOP (Archivio informatico nazionale delle opere pubbliche) è invece un database digitale in cui sono censite tutte le opere pubbliche, tra cui ponti e viadotti stradali e ferroviari, dove è possibile reperire tutte le informazioni riguardanti ogni singola opera, con lo scopo finale di avere maggiore accessibilità alla

documentazione delle stesse (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2019).

1.2.1 Crollo del viadotto Petrulla

Il 7 luglio 2014 alle 11,25 circa, crolla una campata del viadotto Petrulla sulla statale 626 in direzione Licata-Braemi. Due sono state le auto coinvolte oltre ad altri veicoli interessati da una serie di tamponamenti a catena provocati dal tentativo di arrestare la marcia per evitare di cadere nel vuoto, complessivamente si contavano quattro feriti ma nessuna vittima. L'opera era stata realizzata sul finire degli anni Settanta, costituita da dodici campate con un impalcato di travi in c.a.p. a cavi post-tesi. Dalle prime indagini effettuate dall'ANAS l'evento era da imputare al collasso delle travate sebbene non fossero stati individuati segni premonitori né situazioni di degrado particolarmente gravose. Successivamente, il comitato tecnico presieduto dal Prof. Paolo Petrangeli individuò come causa la corrosione dei cavi da precompressione. Il fenomeno corrosivo, invisibile alle ispezioni esterne che furono eseguite, determinò una progressiva perdita della capacità portante delle travi sino al raggiungimento delle condizioni di collasso della struttura. Vennero effettuati inoltre dei sopralluoghi anche sulle opere della stessa statale 626 che presentavano caratteristiche strutturali simile al ponte crollato (Lupi, 2015).

Fig. 1.1 – Campata crollata del viadotto Petrulla

1.2.2 Crollo del cavalcavia ad Annone

Il 28 ottobre 2016, intorno alle 17,20, crolla un cavalcavia lungo la strada statale 36, nei pressi di Annone; l'evento causò un deceduto e sei feriti. Il ponte era stato realizzato fra il 1960 ed il 1962, la lunghezza complessiva dell'opera era di 56 m divisa in tre campate, l'impalcato era costituito da una soletta in c.a. appoggiata su cinque travi in c.a.p.. Le campate laterali erano sostenute dalle spalle e da un appoggio intermedio dal quale esse erano aggettanti, cosicché, la campata centrale era in appoggio indiretto su sella Gerber. Dallo studio effettuato dal consulente tecnico nominato a seguito del crollo (Prof. Marco Di Prisco) si evince che al momento del collasso, sul cavalcavia, transitava un mezzo di trasporto eccezionale dal peso complessivo di 108 t. Tuttavia, è necessario considerare che sul ponte agiva un peso proprio complessivo pari a 172 t, superiori alle 155 t previste dal progettista dell'opera e a questo si aggiunge un carico variabile da traffico anche esso diverso da quello previsto originariamente, che era pari a 88 t sull'intera campata. Sul ponte non vi erano alcune limitazioni di carico imposte e, i dati che furono trasmessi dalla società a cui il carico era diretto evidenziarono che nella sola giornata del crollo transitarono sull'opera quattro convogli con peso complessivo superiore alle 70 t. Infine, va aggiunto che le selle Gerber erano affette da un errore di progettazione e che su una di queste fosse presente una fessura a taglio che aveva favorito la corrosione delle armature presenti. Alla luce di tali informazioni si può concludere che le condizioni critiche in cui versavano gli appoggi Gerber accompagnate dal transito di veicoli che portavano il ponte a condizioni di carico prossime a quelle di rottura, generarono una circostanza per la quale al passaggio del mezzo più pesante l'opera arrivò al collasso (M. Di Prisco, M. Colombo, P. Martinelli, D. Coronelli, 2020).

Fig. 1.2 – Campata Gerber crollata ad Annone

1.2.3 Crollo del cavalcavia sull'A14

Il crollo del cavalcavia n. 167 lungo la A14 all'altezza di Camerano (AN) avvenne nel pomeriggio del 9 marzo 2017 e provocò due morti e tre feriti. Il ponte era disposto su tre campate, le due più esterne realizzate con un graticcio di travi e traversi in c.a., mentre quella centrale, più lunga, aveva un impalcato costituito da una soletta in c.a. poggiante su due travi in acciaio. Il giorno del crollo stavano avvenendo, sugli appoggi della campata centrale, delle operazioni di manutenzione per le quali era previsto il sollevamento dell'impalcato. Da quanto emerge dalla relazione redatta dall'Ing. Annovi, perito tecnico nominato dal sostituto procuratore, il ponte collassa dopo una serie di fasi di sollevamento che provocarono un movimento rotazionale dell'impalcato; infatti, l'opera, contrariamente alle altre presenti in quel tratto, aveva un impalcato obliquo e nel momento dell'innalzamento iniziò ad accumulare rotazioni che infine ne decretarono il cedimento. Di fatto, come suggerisce il perito, mancavano opportune verifiche in fase di progettazione dei lavori che potessero prevedere quel tipo di movimento (Corriere Adriatico, 2019).

Fig 1.3 – Ponte crollato sulla A14

1.2.4 Crollo del ponte di Fossano

Intorno alle ore 15 del 18 aprile 2017 crolla una campata di un ponte lungo la tangenziale di Fossano, fortunatamente non si contano né morti né feriti, resta schiacciata sotto le macerie soltanto un'autovettura dei Carabinieri, appartenente ai due militari che stavano svolgendo controlli di routine. L'opera risaliva agli anni Novanta e si trattava di un impalcato a cassone realizzato in conci, tenuti insieme dall'azione dei cavi da precompressione presenti all'interno. La peculiarità di questo evento è legata al fatto che sul ponte non stesse transitando alcun mezzo, perciò, l'opera è crollata sotto il suo stesso peso. Dalle ipotesi tecniche effettuate sulle possibili cause, sembrerebbe che il collasso sia imputabile alla riduzione di sezione dei cavi da precompressione, promossa o comunque aggravata da condizioni ambientali avverse generate dalla frequente presenza, in inverno, di sali disgelanti sulla carreggiata. Questa ipotesi potrebbe essere in linea con la rottura di tipo fragile avvenuta, molto affine alla rottura dei cavi armonici da precompressione, ma concorderebbe anche con l'assenza di veicoli al disopra.

Fig. 1.4 – Crollo del ponte di Fossano

1.2.5 Crollo del ponte "Morandi"

Il 14 agosto 2018, verso le ore 11:36 avvenne il crollo del viadotto sul Polcevera, o più comunemente ponte "Morandi", dal nome dell'Ingegnere che lo progettò alla fine degli anni Cinquanta, Riccardo Morandi. Nel crollo persero la vita un totale di quarantatré persone, fatto che, oltre all'importanza rivestita dall'opera a livello viario, ne determinò un elevato risalto mediatico. L'opera, terminata nel 1967, poteva essere suddivisa in due parti: dalla spalla (lato Savona) fino alla pila 8 la struttura era costituita da pile a cavalletto che sostenevano centralmente una campata Gerber, successivamente alla pila 8 invece il ponte diventava strallato e vantava di tre antenne (pila 9, 10 e 11) dalle quali partivano quattro stralli che sorreggevano l'impalcato, intervallato da piccole campate Gerber (Fig. 1.5).

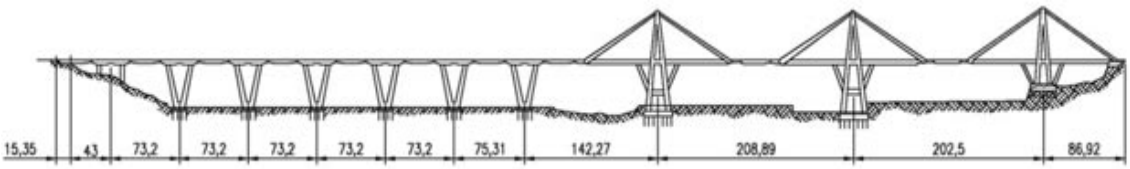


Fig. 1.5 – Schema statico del viadotto sul Polcevera

Nella parte strallata l'impalcato era caratterizzato da un cassone pluricellulare di larghezza pari a 18 m ed altezza di 4,5 m. Gli stralli erano realizzati con cavi principali portanti (trefoli da c.a.p. da ½ pollice) tesati fino a rendere orizzontale l'impalcato. Va osservato che tali cavi, lunghi circa 84 m, non avrebbero mai avuto rigidezza tale da poter fornire un vincolo fisso all'impalcato, pertanto, Morandi li inguainò in un getto di cls, precompresso da ulteriori cavi secondari, col fine di incrementarne la rigidezza e al contempo proteggere i cavi principali dalla corrosione (Pignagnoli, 2019).

Alla luce delle caratteristiche e dello schema statico dell'opera, secondo le perizie effettuate la causa del crollo è sostanzialmente legata a due circostanze; da una parte a carenze attribuibili alla fase di costruzione del viadotto, dall'altra alla mancata manutenzione dello stesso. Infatti, da quanto emerso dalle indagini, i cavi principali degli stralli al di sopra della pila 9, si trovavano in un avanzato stato di corrosione promosso da una non corretta iniezione delle guaine, situazione mai indagata e quindi mai risanata, neanche durante una fase di importanti interventi manutentivi avvenuti nel 1993. Nel momento in cui la sezione dei cavi raggiunse dimensioni eccessivamente ridotte, lo strallo cedette e con esso l'intera pila e l'impalcato sostenuto, provocando la tragedia tristemente nota (Comi, 2021).

Fig. 1.6 – Il viadotto sul Polcevera dopo il crollo della pila 9

1.2.6 Crollo del ponte di Caprigliola

Il ponte sul Magra, appartenente alla SP70, che collega le due frazioni di Aulla, Caprigliola ed Albiano Magra, crollò intorno alle 10:14 dell'8 aprile 2020. Fortunatamente non si contarono morti poiché in quel periodo, in tutto il territorio italiano, era in vigore la zona rossa per contrastare i contagi della pandemia da Covid-19. Il ponte, costruito inizialmente fra il 1905 ed il 1908, era caratterizzato da 5 campate ad arco in c.a.. Verso la fine della Seconda guerra mondiale il ponte fu minato dalle truppe tedesche in ritirata, distruggendo tutte le campate ma lasciando intatte le pile. Alla fine dell'evento bellico, l'opera fu ricostruita mantenendo lo schema strutturale originario ma sulla base delle più recenti normative (Wikipedia, 2021). Le cause del crollo, secondo le perizie, sono attribuibili alla presenza di una paleofrana che, lentamente e propagandosi da monte verso valle, spingeva sulle sponde, decretando in ultimo il collasso dell'intera struttura.

Fig. 1.7 – Il ponte di Caprigliola dopo il crollo

1.3 Quadro normativo in materia di ispezione, manutenzione e monitoraggio dei ponti

Le problematiche relative all'ispezione, alla manutenzione ed al monitoraggio delle opere infrastrutturali, non sono tematiche recenti. Numerose, infatti, sono le norme aventi ad oggetto tali questioni, anche se nel corso del tempo non sono state frequentemente applicate. Di seguito, a scopo informativo, vengono ripercorse le normative più rilevanti.

In primo luogo, dunque, risulta opportuno rinviare alla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 6736/61/A1 del 19/07/1967 "*Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali*": tale documento, il primo in merito alle modalità di ispezione dei ponti in Italia, nasce a seguito del tragico crollo del ponte di Ariccia. Allora come oggi, fra le tematiche che la normativa inquadra come effettive problematiche sulle condizioni delle infrastrutture vengono citate, ad esempio, l'età delle opere, le variazioni dei carichi da traffico, ecc. . Nel testo della circolare si specificano le periodicità con cui devono essere effettuate le ispezioni, le quali devono avere, almeno ricorrenza trimestrale, quelle svolte dai tecnici impiegati degli enti gestori competenti, e almeno ricorrenza annuale, quelle

eseguite sotto la responsabilità degli ingeneri addetti alla zona. Queste ultime, inoltre, devono essere caratterizzate da un maggior grado di approfondimento. Si precisa che i citati termini rappresentano le tempistiche minime da rispettare, pertanto, è comunque possibile effettuare ispezioni accurate o meno anche nella circostanza in cui si manifestino problematiche che possano destare preoccupazione in merito all'integrità dell'opera stessa. La normativa sancisce inoltre la necessità di controllare ogni manufatto appartenente al ponte e di redigere apposite schede in cui vengano riportate tutte le informazioni raccolte dall'azione ispettiva. La vigilanza delle opere viene organizzata a livello giurisdizionale cosicché ad ogni ente gestore o amministrazione spetta la vigilanza sulle opere di propria competenza (Ministero dei Lavori Pubblici, 1967).

Secondariamente, invece, il riferimento è alla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 34233 del 25/2/1991 "*Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali*": tale circolare, più genericamente, definisce tutte le considerazioni da effettuare alla base della progettazione di un'opera infrastrutturale di scavalco ma riserva l'articolo 9 per più specifiche considerazioni sulla gestione dei ponti. In merito a questa parte, si può affermare che le indicazioni riportate non differiscono di molto rispetto ai contenuti della circolare del 1967, ma vengono chiariti maggiormente gli aspetti fondamentali. Si parla sempre, fermo restando le competenze già chiarite dalla precedente circolare, di vigilanza, di ispezioni e di manutenzione (questa volta suddivisa in ordinaria e straordinaria) a cui si aggiungono anche opportune indicazioni sugli interventi, distinti in restauro statico, adeguamento e ristrutturazione. Rimanendo nel tema della vigilanza e delle ispezioni, viene specificato che la prima deve essere considerata come un'azione ordinaria e permanente col compito di individuare nell'opera possibili condizioni che necessitano di valutazioni più approfondite. In merito alle ispezioni, oltre ad essere necessarie ogni qualvolta si presentino situazioni più preoccupanti, restano in vigore i termini di periodicità descritti nella circolare del '67 commisurando però l'approfondimento dell'indagine in relazione alla rilevanza della struttura (Ministero dei Lavori Pubblici, 1991).

In ultimo, si fa riferimento al D.M. del 14/01/08 "*Norme tecniche per le costruzioni*" ed alla circolare esplicativa n. 617 del 02/02/09, nonché ai relativi aggiornamenti della stessa previsti dal D.M. 17/1/18 e dalla circolare n. 7 del 21/1/19: all'interno di tali documenti

normativi non sono contenute indicazioni in merito alla periodicità e alle modalità ispettive, per cui a tutti gli effetti queste tematiche rimangono ancorate alle indicazioni riportate dalle precedenti leggi, in particolare a quella del 1967. Le NTC contengono i principi generali per la verifica delle strutture esistenti, a partire dalla fase conoscitiva delle opere fino a raggiungere la vera e propria fase di verifica. Qualche informazione aggiuntiva più specifica, in merito ai ponti esistenti può essere rintracciata al paragrafo C8.8. Più nel dettaglio, le norme tecniche prevedono che le verifiche di sicurezza si articolino nelle seguenti fasi:

- Analisi storico-critica: nella quale è necessario reperire tutta la documentazione attinente all'opera con lo scopo di individuarne le caratteristiche geometriche e strutturali originarie nonché di rintracciare possibili interventi, di qualsivoglia natura, avvenuti nel corso della vita dell'opera stessa;

- Rilievo: in questa fase rientra l'esame visivo della struttura da cui è possibile ricavarne l'effettiva geometria e definire globalmente le condizioni in cui essa versa;

- Caratterizzazione meccanica dei materiali: a riguardo la normativa prevede l'esecuzione di una serie di indagini atte a verificare, in maniera specifica, le caratteristiche meccaniche dei materiali componenti la struttura definendone inoltre le modalità con cui esse devono essere svolte;

- Definizione dei livelli di conoscenza e dei fattori di confidenza: a seguito delle indagini e in base al grado di approfondimento delle stesse è possibile accedere ad un livello di conoscenza, suddivisi in LC1, LC2 ed LC3. Per ognuno di questi le NTC specificano dei fattori, chiamati fattori di confidenza, con i quali andranno ridotte le caratteristiche meccaniche dedotte dalla fase ispettiva;

- Definizione delle azioni: in questa fase devono essere definite tutte le azioni che gravano sull'opera. In merito a ciò, è possibile dire che le azioni permanenti e permanenti non strutturali possono essere direttamente desunte in accordo alle geometrie rilevate, mentre per le altre azioni non direttamente ricavabili (azioni

da traffico e sismiche), queste devono essere definite in accordo con quanto previsto dalle stesse normative tecniche.

Al termine di questo percorso si passa alla fase di verifica vera e propria, effettuata in base a quanto previsto in normativa.

È opportuno fare alcune considerazioni in merito alle ultime normative citate in virtù delle motivazioni che successivamente hanno portato alla nascita delle nuove Linee Guida: secondo le NTC 2008/2018 per definire le condizioni di sicurezza in cui versa un'opera infrastrutturale si deve percorrere l'iter appena descritto ma manca una valutazione intermedia, cioè fra la fase ispettiva e quella di verifica, con cui decidere quali ponti necessitano di effettive verifiche dettagliate. Infatti, per portare a termine una valutazione della sicurezza, la conoscenza della struttura in esame deve essere abbastanza approfondita, cosa che però richiede tempistiche lunghe e disponibilità economiche non sempre raggiungibili, in particolar modo dagli enti più piccoli, che saranno quindi costretti a limitare queste valutazioni su un numero molto ristretto di ponti.

1.4 Le nuove Linee Guida

Il Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (precedentemente Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), ha introdotto le nuove "*Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*", approvate dall'assemblea generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 06/05/20. Lo scopo fondamentale del documento è quello di definire le modalità operative per poter prevenire livelli inadeguati di danno, rendendo accettabile il rischio (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020) su tutte le opere d'arte stradali che hanno una luce complessiva maggiore di 6 m; per le opere più piccole di tale termine le indicazioni contenute nel documento non sono obbligatorie, lasciando all'ente gestore o al proprietario dell'opera l'onere di definire le modalità di monitoraggio e sorveglianza. Queste Linee Guida introducono, nel quadro normativo precedentemente discusso, il concetto di classificazione del rischio, definibile mediante un approccio costituito da più livelli, cosicché esso possa fungere da discriminante fra le opere che dalla fase ispettiva dovranno o meno raggiungere le verifiche di dettaglio.

Infatti, come già sottolineato, l'adozione di un simile approccio viene giustificato dall'onerosità delle ispezioni, delle indagini, dei controlli, dei monitoraggi e delle verifiche di sicurezza che, inevitabilmente, si incontrerebbe in altro modo. L'approccio multilivello, passando da valutazioni speditive ma estese a livello territoriale consentono, a seguito della definizione di una classe di rischio (o classe di attenzione), di calibrare le valutazioni di complessità maggiore soltanto sulle opere più critiche (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). Il metodo si articola quindi nei seguenti livelli:

- **Livello 0**: geolocalizzazione e censimento delle opere e delle loro caratteristiche;
- **Livello 1**: sulle opere censite vengono svolte esami visivi e rilievi speditivi per definire nel dettaglio le caratteristiche strutturali e geometriche, le condizioni di conservazione e le caratteristiche geo-morfologiche e idrauliche dell'area;
- **Livello 2**: punto centrale del metodo in cui si raggiunge la classe di attenzione in base alla quale si dovrà decidere come procedere alle fasi successive;
- **Livello 3**: in questa fase vengono svolte valutazioni più accurate che, unitamente alle informazioni reperite al livello 1, consentono di definire la necessità di procedere con verifiche più accurate;
- **Livello 4**: le opere che raggiungono questo livello verranno sottoposte ad accurate valutazioni della sicurezza secondo quanto previsto dalle NTC 2018;
- **Livello 5**: questo livello è previsto soltanto per le opere più importanti delle reti stradali e prevede lo svolgimento di uno studio per individuare il possibile impatto sul contesto socio-economico della zona nel caso di interruzione nell'esercizio della struttura. Nelle Linee Guida non sono riportate informazioni di dettaglio per effettuare relazioni in merito a questo livello.

Si riporta lo schema logico da seguire per l'applicazione del metodo (Fig. 1.8).

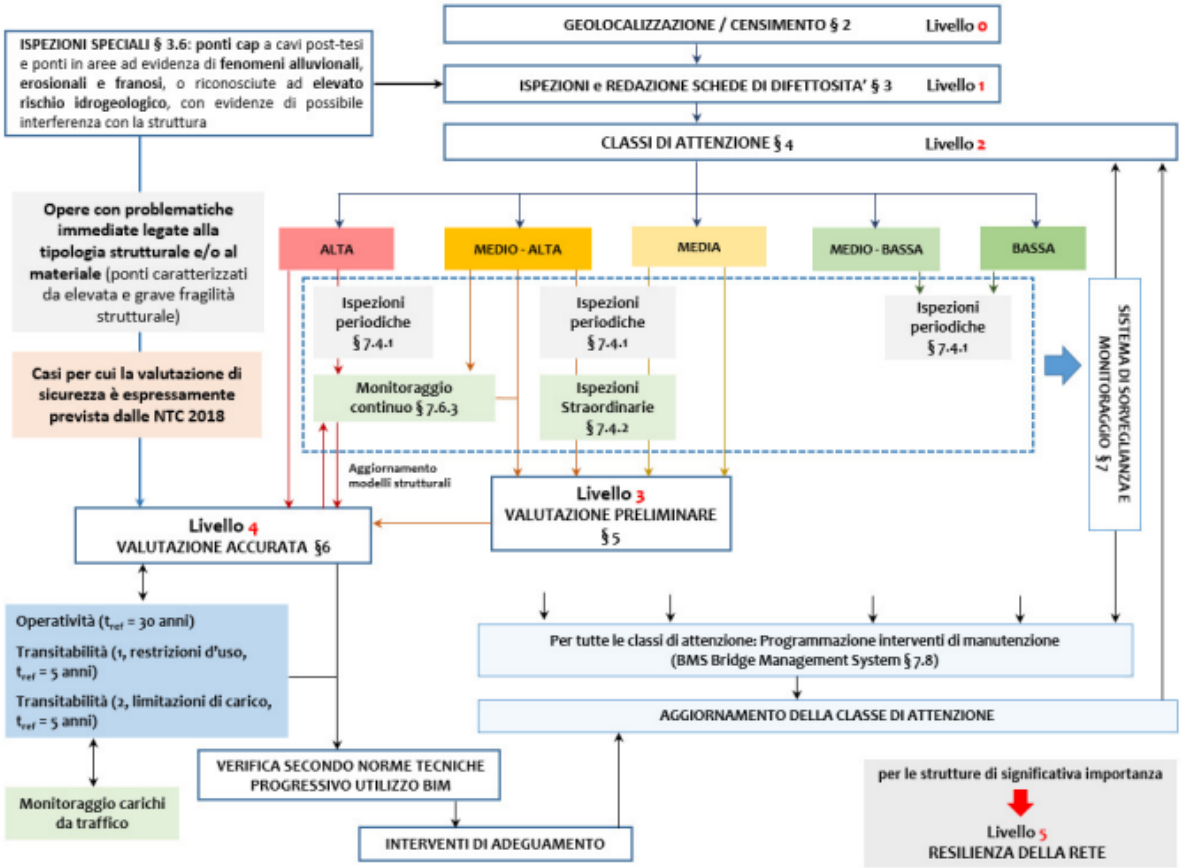


Fig. 1.8 – Flusso logico che illustra le relazioni fra i vari livelli (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Globalmente è possibile suddividere le Linee Guida in tre parti: quella del censimento e della classificazione del rischio (Livelli 0, 1, 2), quella delle verifiche di sicurezza (Livelli 3, 4) ed un'ultima parte relativa alla sorveglianza e il monitoraggio.

Nel seguito vengono approfonditi nel dettaglio i vari livelli con esclusione dei livelli 3, 4 e 5, non essendo stati considerati nel presente lavoro.

1.4.1 Livello 0

La fase di censimento delle opere ha come scopo quello di poter identificare il numero delle opere da gestire, la loro posizione, le caratteristiche geometriche e strutturali ed il contesto in cui queste sono inserite. A tale scopo è necessario reperire tutta la documentazione e le informazioni disponibili sull'opera, sottolineando che questa fase risulta essere cruciale per la classificazione del rischio, pertanto, la ricerca dovrà essere

approfondita ed accurata in modo tale da poter individuare la situazione originaria dell'infrastruttura e quindi ricostruirne le vicende e le trasformazioni subite nel corso degli anni. Ovviamente nelle fasi successive al censimento sarà opportuno verificare la veridicità delle informazioni ottenute. I dati raccolti in questo livello devono essere riportati, per ogni struttura, all'interno delle *"Schede di censimento di livello 0"* predisposte all'interno delle stesse Linee Guida (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020).

1.4.2 Livello 1

Le ispezioni visive di livello 1 sono atte ad indagare le informazioni già ottenute nel precedente livello integrandole, qualora sia necessario, e aggiungendo ulteriori dettagli circa lo stato di conservazione delle opere, anche in maniera speditiva e sommaria. È opportuno quindi procedere ad un attento esame di tutti gli elementi sia all'intradosso che all'estradosso della struttura nonché, qualora possibile, di tutti i vani chiusi come i cassoni e le pile cave. Tutti i dati reperiti devono essere inseriti nelle apposite *"schede di difettosità"* che, successivamente rielaborate, forniranno un parametro fondamentale per le valutazioni del successivo livello. A titolo informativo si riporta un esempio di scheda di difettosità per una pila (Fig. 1.9).

Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

5	**Pile** N ____ Strada di appartenenza: _____ Progressiva km: _____														
	Metallo o Acciaio Tecnico rilevatore: _____ Data ispezione: __ / __ /___														
N°	**Descrizione difetto**	**visto**	**G**	**Estensione K1**			**Intensità K2**			**N° foto**	**PS**	**NA**	**NR**	**NP**	**Note**
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1						
Acc_1	Difetti di saldature	☐	4	☐	☐	☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_2	Rottura di saldature	☐	5	☐	☐	☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_3	Sfogliamento vernice	☐	2	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
Acc_4	Difetti di chiodatura	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_5	Bulloni allentati	☐	4	☐	☐	☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_6	Bulloni tranciati	☐	5	☐	☐	☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_7	Deformazioni anime / piattabande	☐	3	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
Acc_8	Deformazioni pareti travi scatolari	☐	3	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
Dif. Gen_2	Ristagni d'acqua	☐	2	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
Acc_9	Lesioni ai nodi	☐	5	☐	☐	☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_10	Corrosione	☐	4	☐	☐	☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Acc_11	Ossidazione	☐	2	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
Dif. Gen_3	Danni da urto	☐	4			☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Dif. Gen_6	Fuori piombo	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Ril/Fond_1	Scalzamento	☐	5			☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Ril/Fond_5	Movimenti di fondazione	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Eventuali note															

Fig. 1.9 – Esempio di scheda di difettosità per una pila (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Come si evince dall'immagine ogni difetto riscontrabile nell'elemento in esame è contrassegnato da un codice identificativo ed una breve descrizione mentre la colonna nominata *"G"* rappresenta il peso o gravità del difetto, già fissato dalle Linee Guida in funzione delle possibili ripercussioni sull'elemento, e quindi sulla struttura. All'ispettore spetta il compito di valutare, a seguito di un attento esame visivo, l'estensione del difetto sull'intero elemento e la sua intensità e, preferibilmente, di riportarne anche una documentazione fotografica. In ogni caso, a supporto dell'lavoro di ispezione, le Linee Guida forniscono un ulteriore allegato (Allegato C *"schede difettologiche"*) nel quale vengono descritti nel dettaglio tutti i difetti contemplati nelle schede di rilievo.

Esistono alcuni casi per i quali, a seguito delle informazioni ottenute dai livelli 0 ed 1, si passa direttamente all'esecuzione delle verifiche approfondite previste al livello 4 senza passare per la fase di classificazione del rischio. I casi specifici sono due:

- Ponti per i quali è necessaria la valutazione della sicurezza secondo quanto previsto dalle NTC 2018 al capitolo 8.3;

- Ponti caratterizzati da elevata "fragilità" intrinseca per i quali anche minime variazioni delle caratteristiche strutturali, compromettendo i meccanismi resistenti, potrebbero portare a crisi di tipo fragile.

Bisogna aggiungere che anche le opere situate in aree ad evidenza di fenomeni alluvionali, erosionali e franosi come anche i ponti in c.a.p. a cavi post-tesi, in particolar modo se costruiti intorno agli anni 60/70, potrebbero essere oggetto di valutazioni più accurate (di livello 4) senza passare per la valutazione della classe di attenzione. Infatti, se nella prima casistica appaiono evidenti le possibili criticità, nel secondo caso va precisato che per questa particolare tipologia di opere, né le convenzionali tecniche di indagine né tanto meno gli esami visivi sono in grado di descrivere dettagliatamente l'effettivo stato di degrado delle armature di precompressione. In questi casi, quindi, vengono effettuate delle ispezioni speciali (Allegato D delle Linee Guida *"schede di ispezione speciale"*) per poter indagare a fondo le problematiche descritte e successivamente decidere se per tali strutture devono essere svolte verifiche accurate oppure se si può proseguire con la classificazione del rischio (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020).

Per completezza di informazione si aggiunge che anche gli aspetti idrogeologici devono essere valutati in questa fase secondo le apposite *"schede frane e idraulica"*, ma non si approfondisce ulteriormente la questione poiché queste informazioni non sono state trattate nel presente documento.

1.4.3 Livello 2

Conseguentemente alle informazioni raccolte nelle precedenti fasi è possibile, in questo livello, passare alla definizione della classe di attenzione. Nel testo delle Linee Guida viene precisato che a tutti gli effetti non sarebbe corretto parlare di classificazione del rischio; infatti, sebbene i dati raccolti andranno a definire dei livelli di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, le considerazioni che vengono fatte in questa fase dell'approccio risultano essere sommarie e speditive, più adatte a valutazioni di massima piuttosto che ad una vera e propria analisi del rischio, solitamente affine ad uno studio più dettagliato e approfondito. Ciò detto, le Linee Guida prevedono una suddivisione in cinque classi di attenzione (abbreviate in CdA): CdA Alta, CdA Medio-alta, CdA Media, CdA Medio-bassa, CdA Bassa. Per ogni tipo di rischio previsto in un ponte o viadotto, ovvero il rischio strutturale e fondazionale, sismico, idraulico e frane, è possibile ottenere una CdA finale combinando le informazioni di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Infine, la classe di attenzione complessiva di una struttura viene desunta unendo le CdA finali di ogni tipo di rischio. Nel testo del documento normativo sono descritte tutte le tabelle ed i flussi logici da seguire per pervenire ad ogni classe di rischio ma considerazioni più dettagliate in merito verranno affrontate, in questo documento, nel capitolo relativo all'elaborazione statistica dei dati ottenuti dal campione di opere in esame[1].

Il livello 2 viene considerato il punto centrale dell'intero approccio poiché è proprio in questa fase che, previa valutazione della CdA, sarà possibile decidere come proseguire nel controllo delle opere. Se si seguono infatti i flussi logici descritti in Fig. 1.8, è possibile capire quali azioni dovranno essere svolte conseguentemente alla classificazione del rischio:

[1] Capitolo 2, par. 2.2, pp. 34-72

- Per i ponti che ricadono in classe di attenzione Alta si prevede l'avvio diretto di valutazioni più accurate secondo le indicazioni descritte al livello 4. In seguito, dovranno essere effettuate ispezioni periodiche ordinarie come definito nel capitolo dedicato e, qualora lo si ritenga necessario, anche ispezioni periodiche straordinarie oltre all'installazione di sistemi di monitoraggio periodico o continuo;

- Per i ponti che ricadono nella classe di attenzione Medio-Alta si prevedono valutazioni preliminari descritte nel livello 3 e l'esecuzione di ispezioni periodiche ordinare, inoltre, se necessario, dovranno essere svolte ispezioni periodiche straordinarie e l'installazione di sistemi di monitoraggio periodico o continuo. Sarà compito dell'ente gestore o del proprietario di decidere se provvedere o meno a verifiche accurate di livello 4 in seguito ai risultati pervenuti dalle valutazioni preliminari; in tal caso si dovrà riclassificare l'opera in classe Alta.

- Per i ponti che ricadono in classe di attenzione Media andranno eseguite valutazioni preliminari di livello 3 e ispezioni periodiche ordinarie. Se in seguito alle ispezioni vengono identificati fenomeni di degrado in rapida evoluzione sarà opportuno eseguire anche ispezioni periodiche straordinarie. Sarà poi compito dell'ente gestore o del proprietario, sulla base delle valutazioni di livello 3, di decidere se installare sistemi di monitoraggio periodico o continuo (in questo caso riclassificando il ponte in classe Medio-Alta) e/o se eseguire direttamente verifiche accurate di livello 4 (in questo caso riclassificando il ponte in classe Alta);

- Per i ponti che ricadono in classe di attenzione Medio-Bassa non dovranno essere svolte valutazioni più accurate rispetto a quelle già eseguite ma si dovrà procedere con l'esecuzione di ispezioni periodiche frequenti;

- Per i ponti che ricadono in classe di attenzione Bassa, come per la classe precedente, non si dovranno svolgere valutazioni più accurate rispetto a quelle già fatte ma si dovrà procedere con l'esecuzione di ispezioni periodiche (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020).

1.4.4 Le ispezioni sulle opere

Sebbene il tema delle ispezioni non costituisca un punto centrale del presente lavoro, a scopo informativo e a completamento di quanto già descritto in merito al quadro normativo, si vogliono approfondire anche le considerazioni esplicate dalle nuove Linee Guida in materia. Nella terza parte del documento, le nuove direttive si esprimono sull'argomento asserendo che le ispezioni visive, oltre alla finalità della valutazione della classe di attenzione, sono utili per rilevare difetti derivanti dal degrado, dall'utilizzo o da fenomeni ambientali mediante l'uso di semplici misure e prove non distruttive o semi-distruttive. In particolare, vengono contemplate due tipologie di ispezioni, quelle ordinarie e quelle straordinarie.

Sulle ispezioni ordinare le Linee Guida indicano le frequenze minime di ispezione da rispettare che sono espresse in funzione della CdA e delle due tipologie di opere contemplate, ovvero le opere di tipo 1, cioè quelle che sono già inserite nel sistema di sorveglianza conforme alla Circolare n. 6736/61/AI del 1967, e quelle di tipo 2, cioè tutte le opere nuove o esistenti per le quali non sono state effettuate ispezioni ai sensi della Circolare sopra citata. Le nuove tempistiche sostituiscono quelle previste dalla Circolare del '67 eliminando la cadenza trimestrale delle ispezioni poiché considerata eccessiva ma soprattutto poco utile, in quanto i fenomeni di degrado si sviluppano generalmente in tempi più lunghi.

Tab. 1.1 – Frequenza minima delle ispezioni ordinarie (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

CDA -	*Bassa*	*Medio - Bassa*	*Media*	*Medio-Alta*	*Alta*
Frequenza Opere "Tipo 1"	Biennale	18 mesi	Annuale	In funzione del monitoraggio o semestrale	In funzione del monitoraggio o semestrale
Frequenza Opere "Tipo 2"	Annuale	9 mesi	Semestrale	In funzione del monitoraggio o trimestrale	In funzione del monitoraggio trimestrale

Tutte le informazioni raccolte durante la fase ispettiva dovranno essere trascritte su opportune schede di rilievo come, ad esempio, le *"schede di difettosità"* di livello 1. Le ispezioni ordinarie possono essere svolte sia tramite esami visivi nonché utilizzando semplici strumenti di misura così come test di tipo non distruttivo; in ogni caso

l'attenzione deve essere volta sia alla struttura e alle fondazioni, sia all'ambiente circostante con riferimento al rischio frane e alluvioni.

Le ispezioni straordinarie vengono effettuate ogni qualvolta sorga la necessità di approfondire le informazioni derivanti dalle ispezioni ordinarie nel caso in cui queste abbiano evidenziato delle situazioni di criticità o qualora si siano verificati degli eventi eccezionali come incidenti, urti, sismi, ecc., o quand'anche lo studio dei modelli predittivi del degrado mostrino comportamenti anomali. Come descritto dalle Linee Guida, in questi casi sarà necessario eseguire le ispezioni straordinarie al più presto e comunque non oltre i 60 giorni dall'accertamento di tali condizioni. Le ispezioni straordinarie andranno ripetute entro 5 anni per le strutture di classe Bassa o Medio-Bassa, ed entro 2 anni per le altre classi. Le informazioni ottenute da queste indagini devono essere focalizzate sulle criticità evidenziate e riportate dettagliatamente in un rapporto che deve concludersi con considerazioni relative alla valutazione sullo stato dell'opera e sulle tendenze evolutive del degrado, al fine di poter individuare le successive azioni da intraprendere (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020).

Capitolo 2
Elaborazione statistica dei dati raccolti sul campione di ponti esaminato

In questo capitolo, parte centrale del lavoro svolto, verranno esaminati i dati raccolti sul campione delle opere studiate e successivamente elaborati statisticamente con lo scopo finale di poter ricavare, in linea generale, le probabilità che le opere hanno di ricadere nelle varie classi di attenzione. Questo studio è stato svolto tenendo come incognita il livello di difettosità, desumibile soltanto a seguito delle ispezioni previste nel livello 1. Pertanto, dalle informazioni del livello 0 si passerà direttamente al livello 2, dove queste verranno combinate sino al raggiungimento dello scopo suddetto. Si specifica che il campione analizzato è composto da 75 opere fra ponti e viadotti, tutti situati all'interno del territorio marchigiano.

2.1 Livello 0

Per quanto riguarda il livello 0 e quindi il censimento delle opere, non ci sono indicazioni specifiche sulle informazioni da ottenere. Infatti, sebbene le Linee Guida contengano apposite schede per il censimento, queste non sono sicuramente esaustive in quanto durante questa fase è comunque possibile studiare tutti gli sviluppi subiti nel tempo dalle opere, perciò, le informazioni potrebbero andare oltre quelle previste dalle stesse schede. In questo caso i dati sono stati reperiti sia analizzando le documentazioni fornite dagli enti gestori dei ponti sia ricorrendo a sopralluoghi sulle opere da censire.

Si è scelto di dare rilevanza, in questo livello dell'approccio, soltanto ad alcune informazioni principali quali la localizzazione delle opere, la loro età, la tipologia strutturale, il materiale con cui sono state realizzate, con particolare riferimento all'impalcato, ottenendo quindi un quadro generale che mette in evidenza le peculiarità delle infrastrutture. Volendo mostrare le informazioni reperite, sono state prodotte alcune mappe esplicative delle caratteristiche dei ponti appartenenti al campione analizzato.

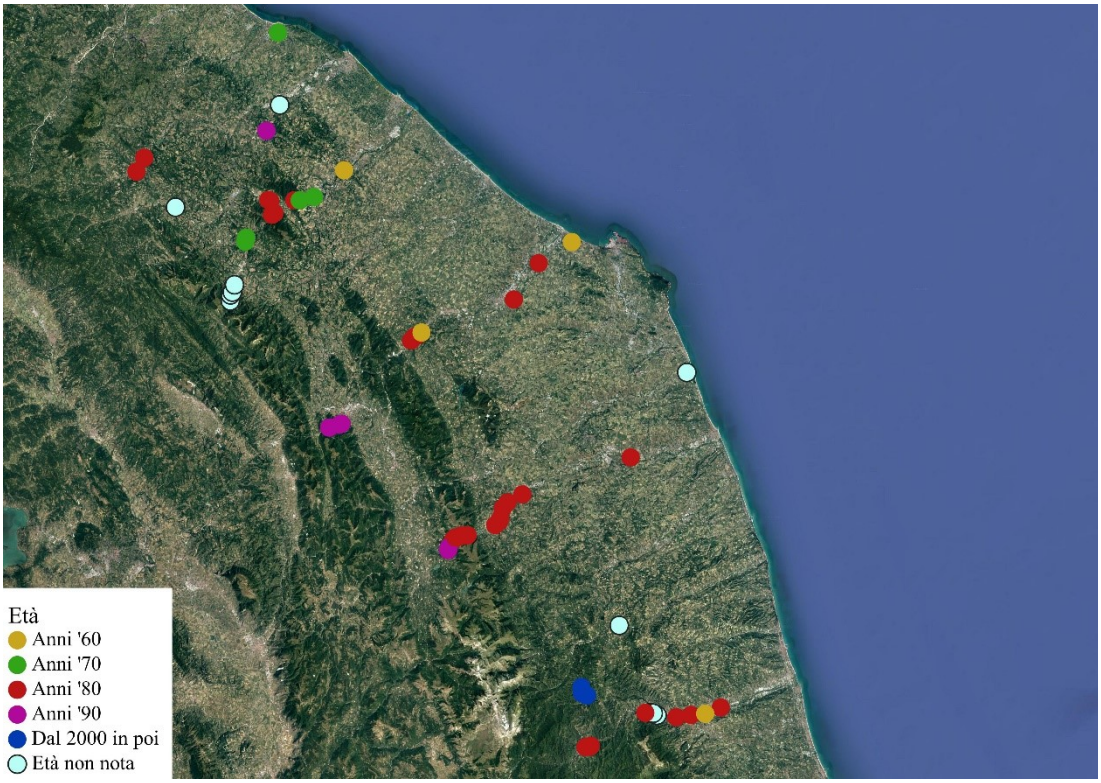


Fig. 2.1 – Mappa ponti per età

Fig. 2.2 – Mappa ponti per tipologia strutturale

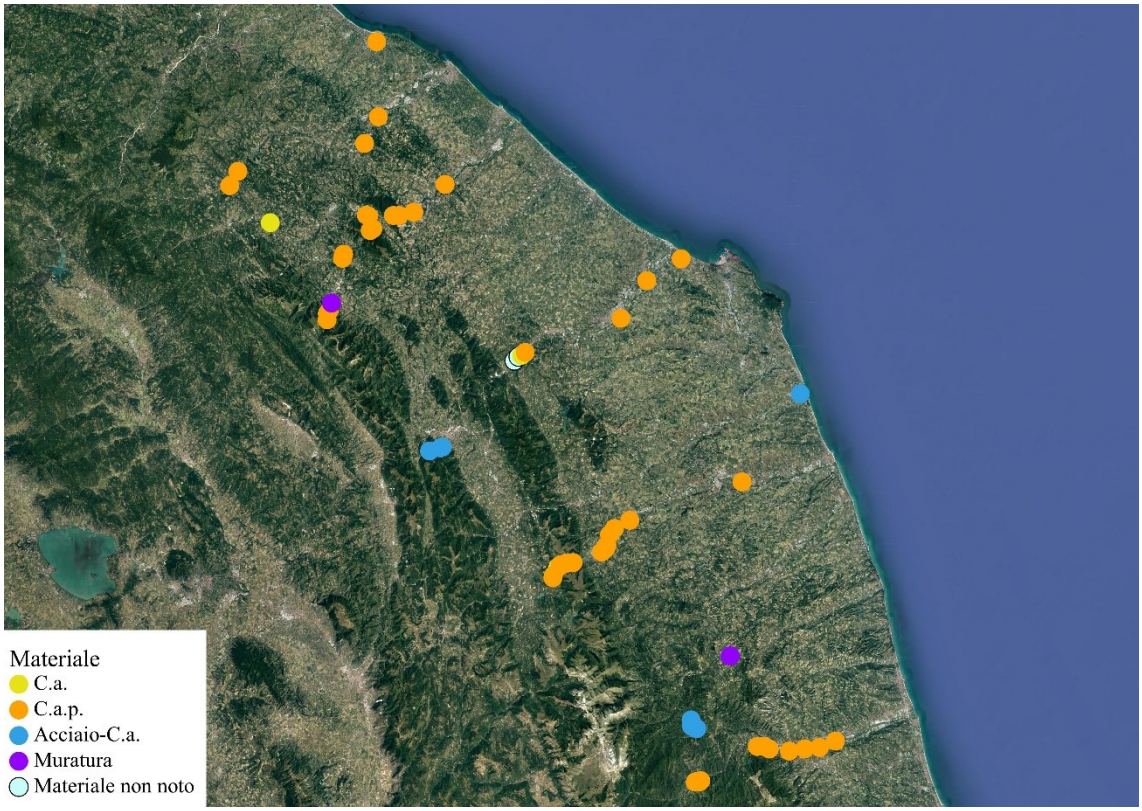


Fig. 2.3 – Mappa ponti per materiale

Le mappe sono state prodotte mediante il software QGIS utilizzando i dati raccolti e forniscono un semplice strumento in cui è possibile localizzare una generica opera e dedurne età, tipologia strutturale e materiale. È da notare che questi elaborati, che esprimono geograficamente il livello 0, condividono lo stesso concetto di base con l'AINOP; quest'ultimo strumento è a tutti gli effetti una mappa digitale in cui vengono visualizzate, in maniera più completa ed estesa a tutte le opere pubbliche, le caratteristiche principali di un'opera.

Dato che le informazioni rappresentate nelle mappe risultano sommarie, queste sono state rafforzate con l'ausilio di alcuni grafici che sono mostrati di seguito.

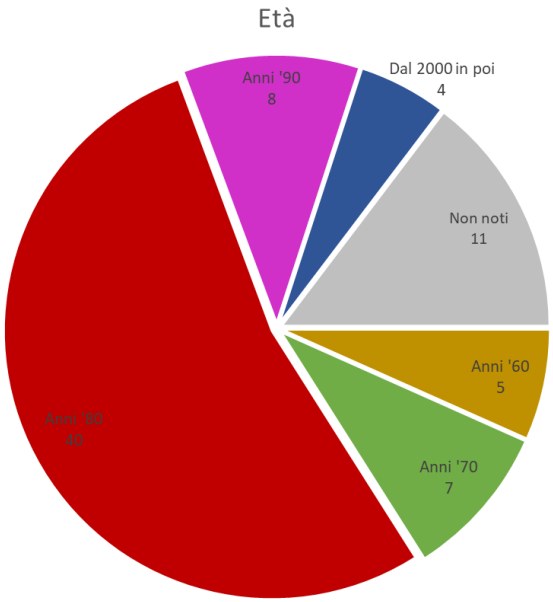


Fig. 2.4 – Ripartizione ponti per età

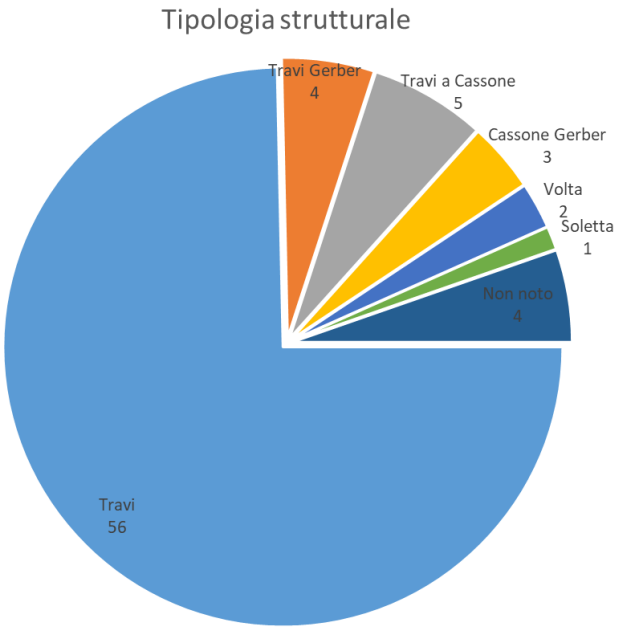


Fig. 2.5 – Ripartizione ponti per tipologia strutturale

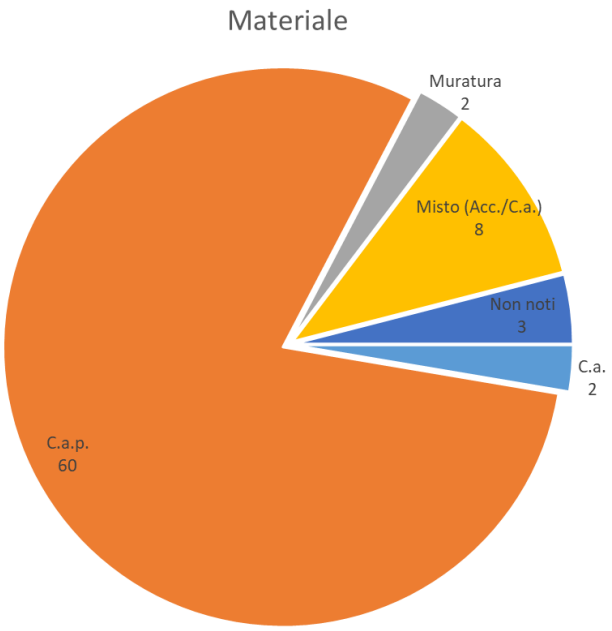


Fig. 2.6 – Ripartizione ponti per materiale

L'analisi dei dati raccolti mette in chiara evidenza che gran parte dei ponti del campione sono stati realizzati durante gli anni Ottanta, circa il 53%, che la tipologia strutturale ricorrente è quella a travi appoggiate alle estremità, circa il 75% delle opere, e che il materiale più frequente è il cemento armato precompresso, 80% delle opere. Tuttavia, in questo modo i dati risultano indipendenti fra loro, pertanto questi sono stati riuniti in un unico grafico.

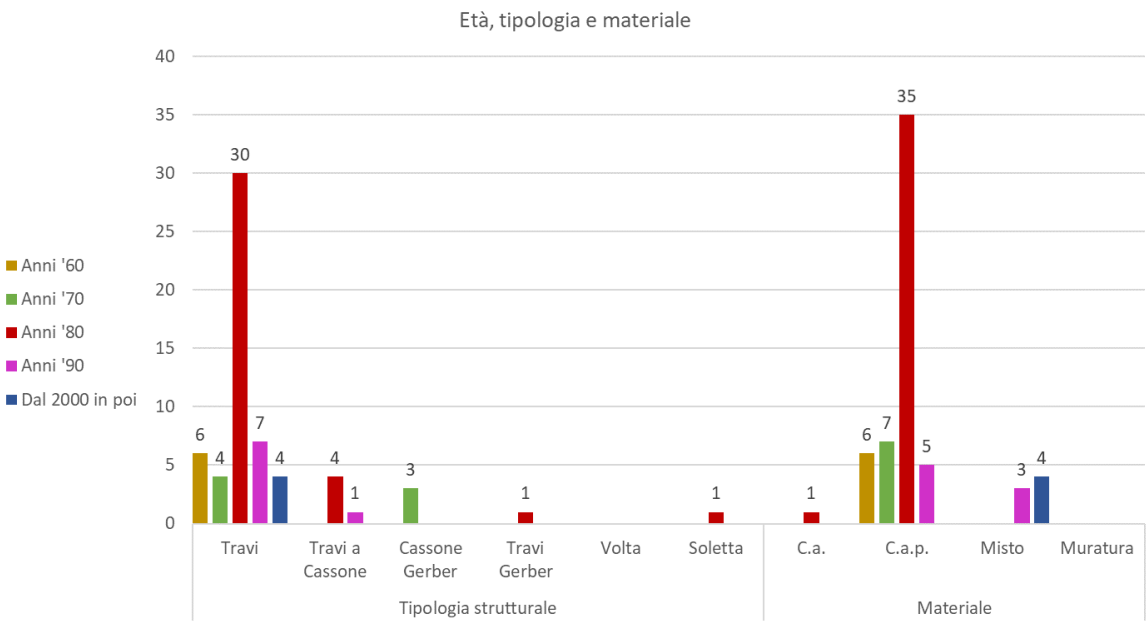


Fig. 2.7 – Grafico riassuntivo delle caratteristiche

I valori massimi individuati in precedenza si ripresentano nuovamente in questo grafico andando a definire le opere frequentemente presenti sul territorio, ovvero ponti costruiti negli anni Ottanta, con un impalcato a travi in c.a.p.. A tal proposito i dati mostrano una situazione sicuramente attendibile; è infatti vero che gran parte delle infrastrutture di scavalcamento sono state progettate durante gli anni Settanta ed infine costruite negli anni Ottanta e durante quel periodo si privilegiava uno schema di tipo isostatico utilizzando quello che allora era considerato un materiale molto prestante, ovvero il c.a.p., giustificato per giunta da luci medie delle campate abbastanza elevate che non sono mai inferiori ai 32 m nel campione analizzato. Si evidenzia che, riguardo al c.a.p., risulta molto importante conoscere la tipologia di tesatura dei cavi; in particolare, se questi sono post tesati, il ponte, successivamente al livello 1, potrebbe essere oggetto di ispezioni speciali che definiranno la necessità dell'opera di proseguire per la classificazione del rischio o di passare direttamente a verifiche accurate. In questo caso però, sebbene importante, questa informazione non è stata approfondita in quanto il fine del lavoro esula dalla necessità o meno di ispezioni speciali per i ponti studiati, portandoli comunque alla classificazione del rischio.

Un altro aspetto interessante che si individua nelle valutazioni di livello 0 è la disponibilità di documentazione sulle opere.

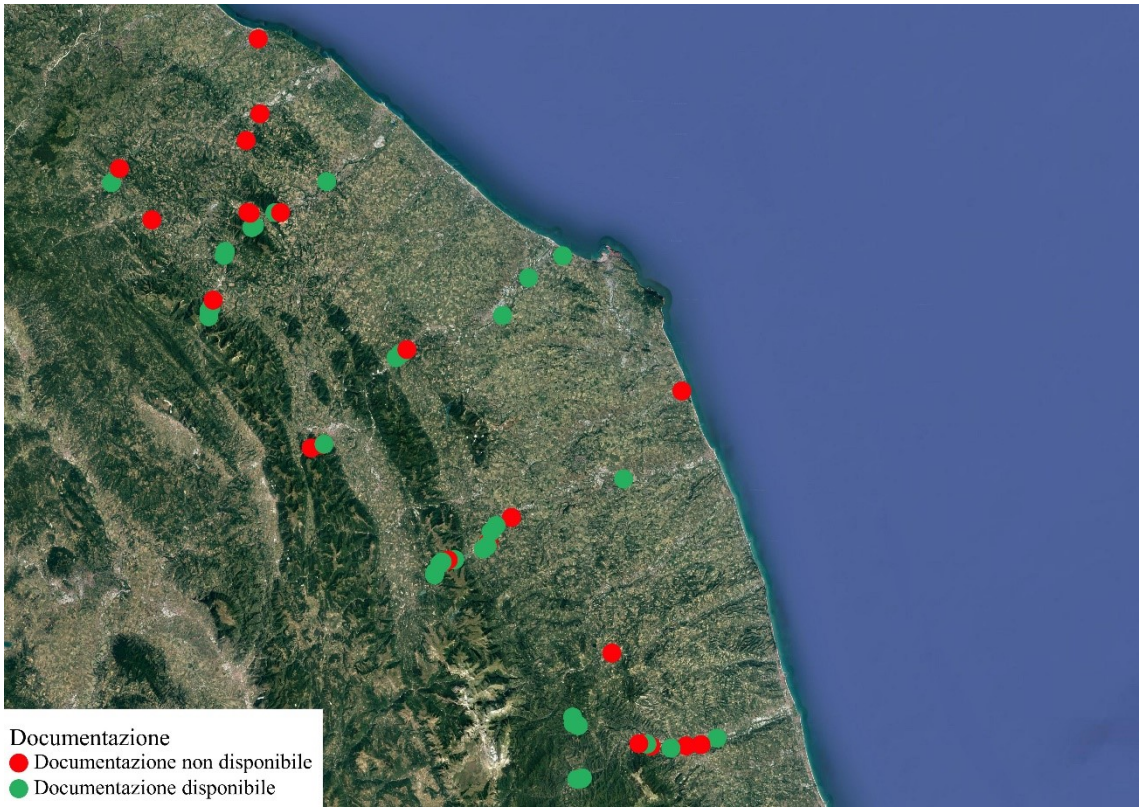


Fig. 2.8 – Mappa disponibilità di documentazione per ponte

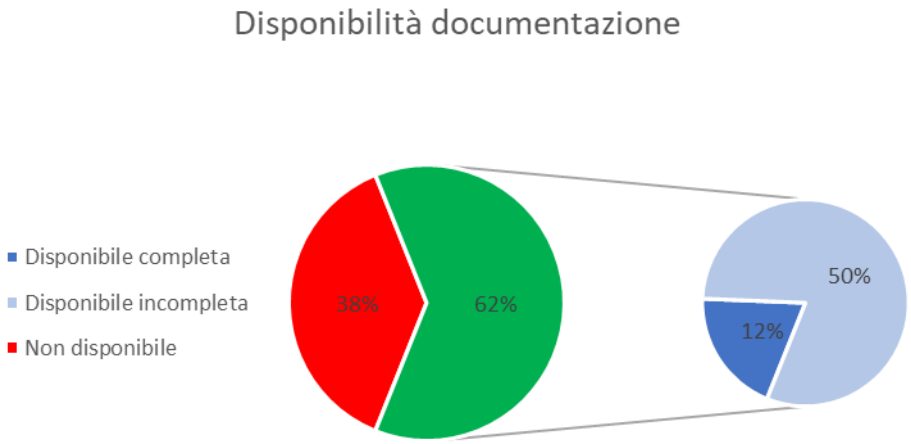


Fig. 2.9 – Grafico della documentazione disponibile

Sebbene nel livello 0 vengano fatte valutazioni sommarie, va comunque tenuto in considerazione il fatto che molte delle informazioni raccolte andranno a definire i percorsi logici che portano alla classe di attenzione. Nel caso in cui alcune informazioni non siano disponibili, dovendo comunque raggiungere una classe di attenzione, sarà necessario formulare delle ipotesi che, nel dubbio, dovranno essere a favore di sicurezza e questo porterà inevitabilmente a classi di rischio in linea generale più elevate.

Nei casi in questione si può notare, dalle valutazioni effettuate, che per il 62% delle opere i documenti risultano accessibili ma di questo 62% solo per il 12% l'accesso alle informazioni risulta essere completo, mentre per il restante 50% la documentazione risulta incompleta. Ovviamente nelle Linee Guida la distinzione fra documentazione completa ed incompleta non è contemplata, pertanto si è ipotizzato di considerare completa l'accessibilità ai dati che permetta di ottenere tutte le informazioni principali da utilizzare per la classificazione del rischio quali, ad esempio, l'anno di costruzione, lo schema strutturale, il materiale, le norme di progettazione utilizzate, ecc.. Alla luce dei risultati ottenuti, risulta evidente che per poter proseguire con la valutazione della classe di attenzione, in tutti i casi in cui i documenti non siano sufficienti a determinare dei dati, sono state introdotte delle ipotesi che verranno dettagliate nel seguito.

2.2 Livello 2

Le informazioni raccolte nel livello 0 sono state inserite nei percorsi logici che costituiscono il livello 2 tenendo incognito lo stato difettosità delle opere (previsto al livello 1). Pertanto, non si può parlare di una classe di attenzione certa ma soltanto di probabilità di ricadere in alcune delle classi previste dal documento normativo. Nel seguito verranno descritti e dettagliati tutti i passaggi previsti dalle Linee Guida per definire la classe di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione che, a loro volta, andranno a comporre una classe di rischio finale, sia relativamente alla parte strutturale e fondazionale che a quella sismica. Dato che i documenti consultati non raggiungono lo stesso livello di dettaglio in tutte le opere, è opportuno sottolineare che in alcuni casi i grafici riassuntivi delle informazioni sono riferiti ad un numero di ponti inferiori rispetto al totale che compone il campione analizzato.

2.2.1 Pericolosità strutturale e fondazionale

La pericolosità è legata alla possibilità di transito, sul ponte, di carichi aventi massa rilevante; infatti, a parità di caratteristiche strutturali, un'opera su cui avviene un frequente passaggio di mezzi pesanti è sicuramente più a rischio di una interessata da flussi di traffico ordinari (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). Va però tenuto in considerazione il fatto che sui ponti possano esistere delle limitazioni di carico, imposte dagli enti gestori a seguito di valutazioni sull'adeguatezza delle opere nei confronti delle azioni previste dalle normative vigenti. Ai fini della valutazione della pericolosità, una prima classificazione viene fatta proprio in funzione delle limitazioni di traffico imposte sulla struttura. Le classi previste sono le seguenti:

- **Classe A**: il ponte è in grado di sostenere i carichi di progetto previsti dalle NTC 2018;
- **Classe B**: limitazione di carico a 44 t;
- **Classe C**: limitazione di carico a 26 t;
- **Classe D**: limitazione di carico a 8 t;
- **Classe E**: limitazione di carico a 3,5 t.

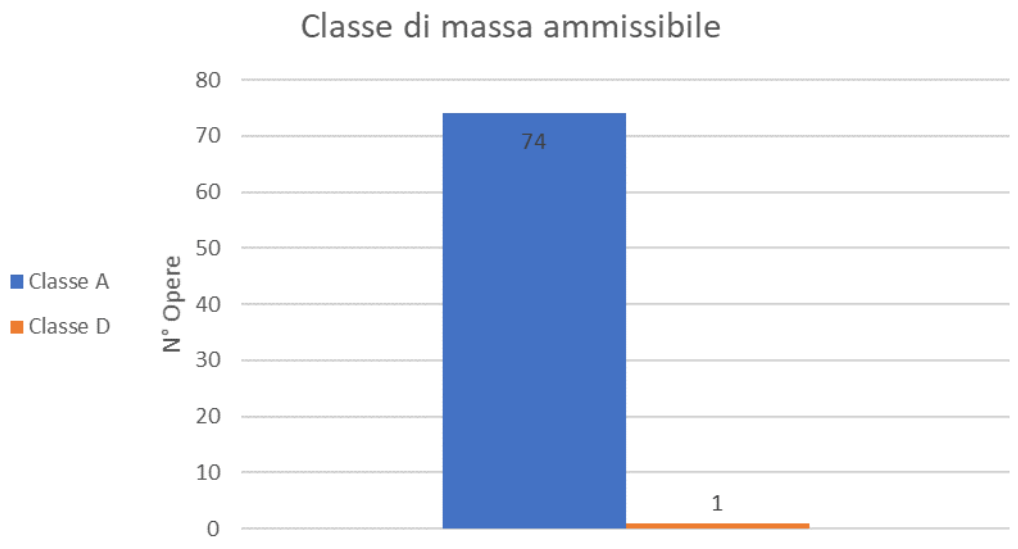


Fig. 2.10 – Suddivisione delle opere per massa ammissibile

Nella figura precedente è riportata la suddivisione in classi per le opere analizzate; si nota che dei 75 ponti, per tutti eccetto uno, non sono state previste limitazioni del traffico, perciò rientrano nella Classe A. Dato che gran parte delle opere del campione appartengono a strade extraurbane principali e che per queste non sono frequenti limitazioni del carico, appare facilmente spiegabile il risultato descritto.

Il secondo parametro fondamentale è il numero di mezzi pesanti che transitano sul ponte, espresso come numero di veicoli commerciali al giorno per singola corsia di marcia. Al netto della massa che può transitare sulla struttura, infatti, il rischio risulta sempre più elevato in funzione della frequenza di passaggio. Questi dati sono stati ricavati dalle analisi sul traffico effettuate dall'ente gestore delle opere in esame. Le Linee Guida identificano tre classi in funzione della frequenza:

- **Alta**: se il transito di mezzi pesanti è maggiore o uguale a 700 veicoli/giorno;
- **Media**: se il transito di mezzi pesanti è compreso fra 300 e 700 veicoli/giorno;
- **Bassa**: se il transito di mezzi pesanti è minore o uguale a 300 veicoli giorno.

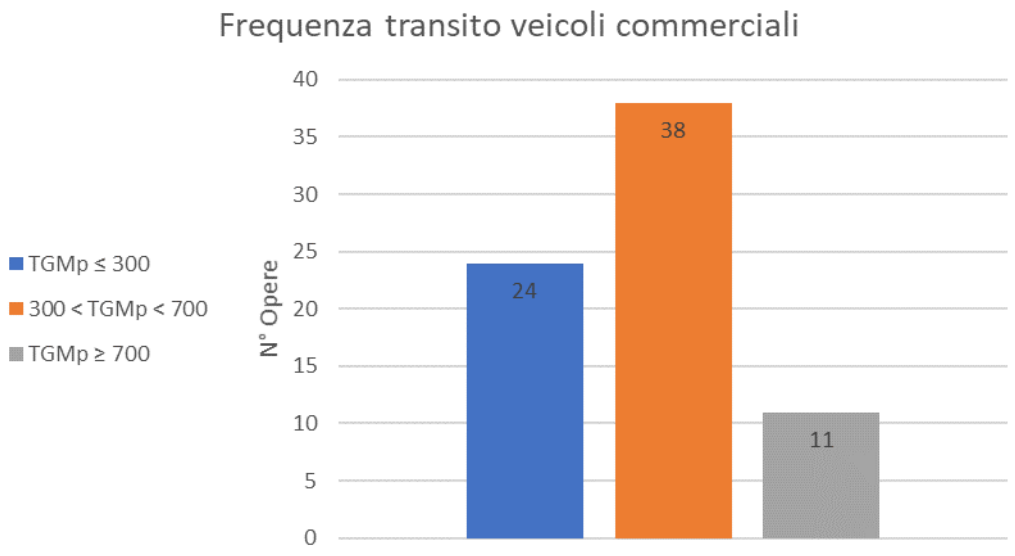


Fig. 2.11 – Suddivisione delle opere per frequenza di transito dei veicoli commerciali

In primo luogo, si può notare che rientrano in questa suddivisione soltanto 73 opere, ovvero due in meno rispetto al totale del campione, in quanto per queste mancavano degli

specifici studi trasportistici. Secondariamente, dai risultati ottenuti si conclude che 38 opere sono in classe media, 24 in classe bassa e 11 in classe alta. Questi due dati sono stati infine combinati secondo quanto descritto dalla tabella riportata in normativa.

Tab. 2.1 – Classi di pericolosità in funzione della classe stradale e della frequenza del passaggio di veicoli commerciali (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Classe A Carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	ALTA	ALTA	MEDIO-ALTA
Classe B Limitazione di carico a 44 t	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	ALTA	MEDIO-ALTA	MEDIA
Classe C Limitazione di carico a 26 t	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	MEDIO-ALTA	MEDIA	MEDIO-BASSA
Classe D Limitazione di carico a 8,0 t	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	MEDIA	MEDIO-BASSA	BASSA
Classe E Limitazione di carico a 3,5 t	BASSA		

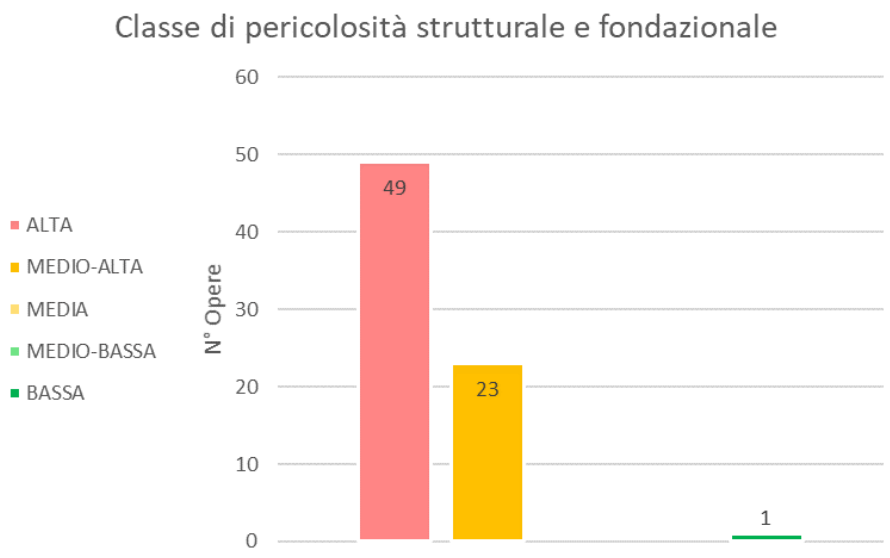


Fig. 2.12 – Classi di pericolosità risultanti per le opere

Si evince che la classe di pericolosità risulta tendenzialmente Alta o Medio-alta. Questo risultato è sostanzialmente legato alla massa ammissibile; è chiaro, infatti, che un potenziale crollo è tanto più tangibile quanto più elevato è il carico che potrebbe transitare sull'opera, pertanto, l'assenza di limitazioni viene scontata con una pericolosità maggiore.

2.2.2 Vulnerabilità strutturale e fondazionale

Per stimare il livello di vulnerabilità le Linee Guida individuano parametri primari (livello di difettosità, schema strutturale, luce, materiale e numero di campate) e secondari (rapidità di evoluzione del degrado e norma di progettazione). Questi dovranno essere a loro volta combinati insieme per raggiungere la vulnerabilità, secondo quanto descritto dal seguente flusso logico.

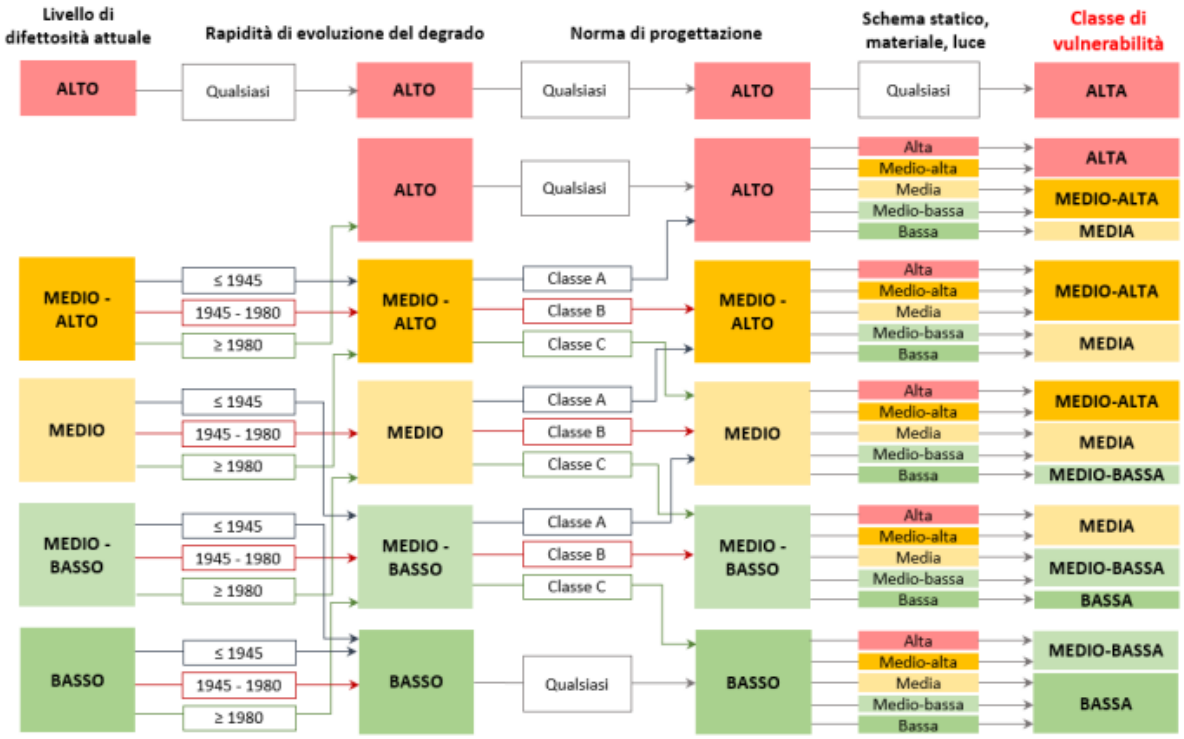


Fig. 2.13 – Flusso logico per la determinazione della classe di vulnerabilità (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Il punto di partenza è il livello di difettosità, parametro primario che viene ricavato dalle ispezioni condotte durante il livello 1 e rappresenta l'attuale stato di conservazione di

un'opera, riassumendolo in una delle cinque classi previste. In questo studio, come già affermato precedentemente, questo dato è stato considerato incognito in quanto non presente per tutte le opere ma nel capitolo 3[2] verranno fatte considerazioni più dettagliate sulla questione.

Il livello di difettosità viene poi modificato in funzione della sua rapidità di evoluzione. Ammettendo che su una generica opera sia presente un certo degrado, risulta evidente che c'è differenza fra il caso in cui questo sia stato raggiunto dopo un periodo di tempo molto lungo piuttosto che dopo poco tempo. Nel primo caso, infatti, si potrebbe pensare ad una condizione "fisiologica" della struttura, mentre, lo stesso stato di conservazione raggiunto in un periodo di tempo più breve è sinonimo di una condizione di degrado più preoccupante (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). Assume rilevanza, in questo contesto, l'anno di costruzione dell'opera oppure l'anno di svolgimento dell'ultimo intervento di manutenzione significativo, nel caso in cui questa sia stata effettuata. Le Linee Guida individuano tre possibili casi:

- Opere con periodo di costruzione od ultimo intervento di manutenzione precedente al 1945;
- Opere con periodo di costruzione od ultimo intervento di manutenzione compreso fra il 1945 e il 1980;
- Opere con periodo di costruzione od ultimo intervento di manutenzione successivo al 1980.

Si specifica che, a tal proposito, non sono state considerate le date di eventuali interventi effettuati sulle opere in quanto le informazioni in possesso non erano sufficienti per poter giudicare nel dettaglio tale parametro; pertanto, si è sempre fatto riferimento alle date di ultimazione dei lavori di costruzione o di collaudo.

[2] Capitolo 3, par. 3.2, pp. 88-101

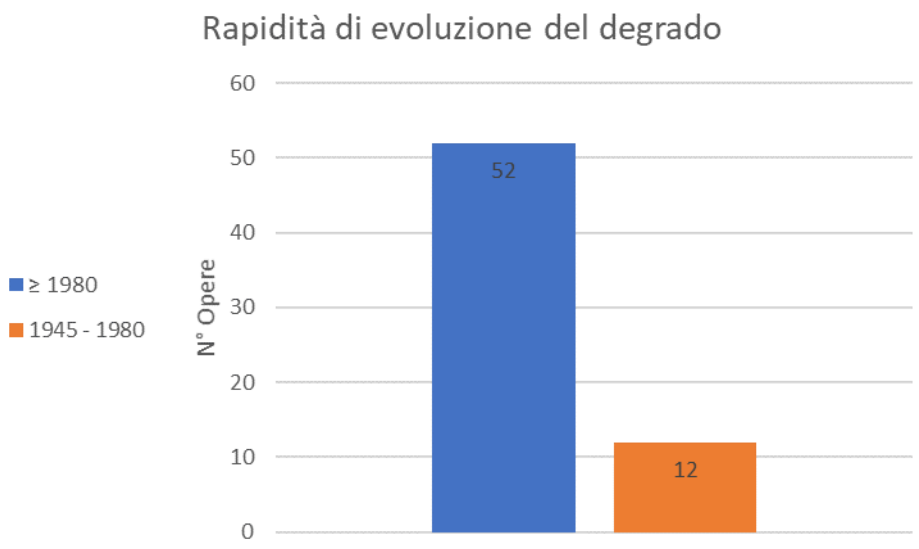


Fig. 2.14 – Suddivisione opere in funzione della rapidità di evoluzione del degrado

Per i ponti posti sotto esame, i grafici mostrano come la maggior parte di essi, risalenti a periodi successivi al 1980, siano in una condizione potenzialmente più critica che segna, quindi, un incremento della classe definita dalla difettosità.

Proseguendo, il secondo parametro che influenza la difettosità è la norma di progettazione dell'opera, dato che essa definisce tutte le ipotesi alla base della realizzazione. Le normative passate, per quanto riguarda i carichi da traffico, differiscono rispetto a quelle attualmente vigenti. Volendo approfondire la questione, venivano contemplati, in passato, ponti di prima categoria, ossia progettati per sostenere carichi civili e militari, e ponti di seconda categoria, destinati a portare soltanto carichi civili. Nel primo caso, gli effetti dei carichi militari, previsti a partire dal 1952, sono paragonabili a quelli dei carichi introdotti dalle nuove NTC, mentre nel secondo caso, invece, i soli carichi civili producono effetti molto meno gravosi di quelli attuali (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). Le Linee Guida chiariscono la questione individuando tre classi:

- **Classe A**: ponti di I categoria progettati con norme antecedenti al 1952 e ponti di II categoria progettati con norme antecedenti al 1990;

- **Classe B**: ponti di I categoria progettati con norme dal 1952 al 1990, inclusi, aventi luci inferiori a 10 m e con norme dal 1952 al 2005, inclusi, aventi luci

superiori a 10 m; ponti di II categoria progettati con norme del 1990 e aventi luci inferiori a 10 m e con norme dal 1990 al 2005, aventi luci superiori a 10 m;

- **Classe C**: ponti di I e II categoria progettati con norme dal 2005 ad oggi, con luci inferiori a 10 m, e con norme dal 2008 ad oggi, con luci superiori di 10 m.

In tutti i casi in cui le informazioni sulle opere sono risultate insufficienti a seguire la classificazione appena descritta, si è scelto di attribuire la categoria II rimanendo a favore di sicurezza, in accordo con quanto proposto dalle Linee Guida.

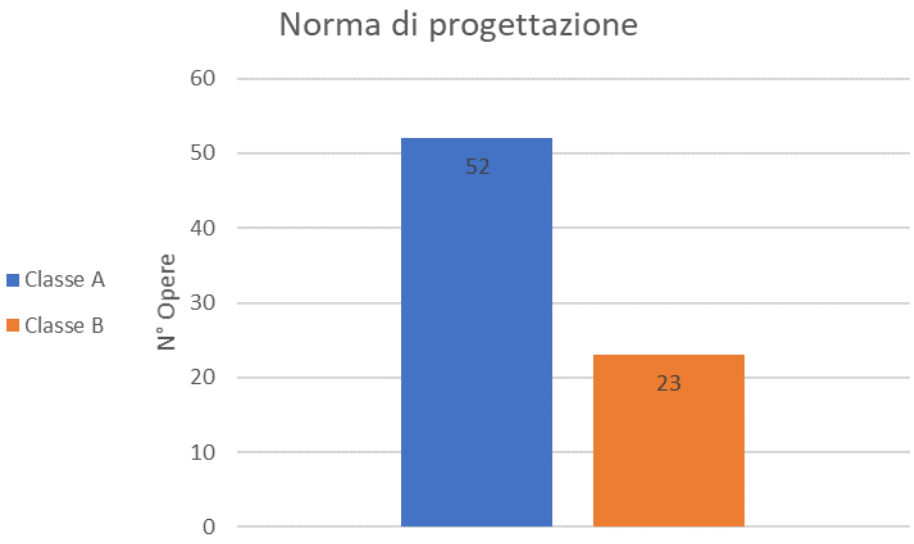


Fig. 2.15 – Suddivisione delle opere per norma di progettazione

Ad eccezione di due ponti in muratura, risalenti presumibilmente alla seconda metà del 1800, tutte le opere che entrano in classe A non dispongono di informazioni dettagliate sulle norme utilizzate per la progettazione dovendo, per questi, fare uso delle ipotesi sopra citate. I risultati ottenuti, quindi, si allineano perfettamente alla situazione descritta al paragrafo precedente[3] in merito alla disponibilità dei dati che vedeva, per gran parte delle opere, l'assenza di informazioni complete.

Infine, come ultimo passo del flusso logico, si considerano lo schema statico, il materiale e la luce della campata più lunga. Volendo approfondire ulteriormente la questione,

[3] Capitolo 2, par. 2.1, p.33-34

alcune tipologie di schemi statici sono maggiormente a rischio come, ad esempio, le strutture isostatiche o con pochi gradi di iperstaticità, poiché in questi casi la crisi di un singolo elemento implicherebbe una possibile condizione di collasso. Si aggiungono anche tutte le tipologie strutturali che presentano elementi suscettibili ai fenomeni di degrado quali, ad esempio, le strutture che presentano selle Gerber. Per quanto concerne i materiali dell'impalcato, alcuni sono più facilmente degradabili o comunque soggetti ad un minor grado di sicurezza. La luce massima della campata più lunga, invece, aumenta la condizione di rischio in relazione al danno che si produrrebbe nel caso di collasso dell'opera (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). Tutte queste variabili sono collegate fra loro secondo la tabella contenuta nel testo delle Linee Guida.

Tab. 2.2 – Classi di vulnerabilità in funzione di schema statico, luce e materiale (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Schema statico	Materiale	L ≤ 5 m	5 m < L < 15 m	15 m ≤ L < 25 m	L ≥ 25 m
Travate appoggiate	C.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
	C.a.p.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	Acciaio	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	Metallo (*Ponti storici*)	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
	Legno	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
	Misto*	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
Travate continue / Telaio	C.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	C.a.p.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA
	Acciaio	BASSA	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA
	Metallo (*Ponti storici*)	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	Misto*	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
Arco massiccio	Muratura	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA
	C.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA
Arco sottile	C.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA	MEDIO-ALTA
Travate Gerber / Ponti a stampella con travi tampone	C.a.	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
	C.a.p.	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	ALTA
	Acciaio	MEDIA	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	ALTA
	Metallo (*Ponti storici*)	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
	Misto*	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Soletta appoggiata	C.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
Soletta incastrata	C.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA

Inoltre, la classe ottenuta dalla Tab. 2.2 deve essere aumentata di un livello nel caso in cui il ponte sia costituito da più di tre campate.

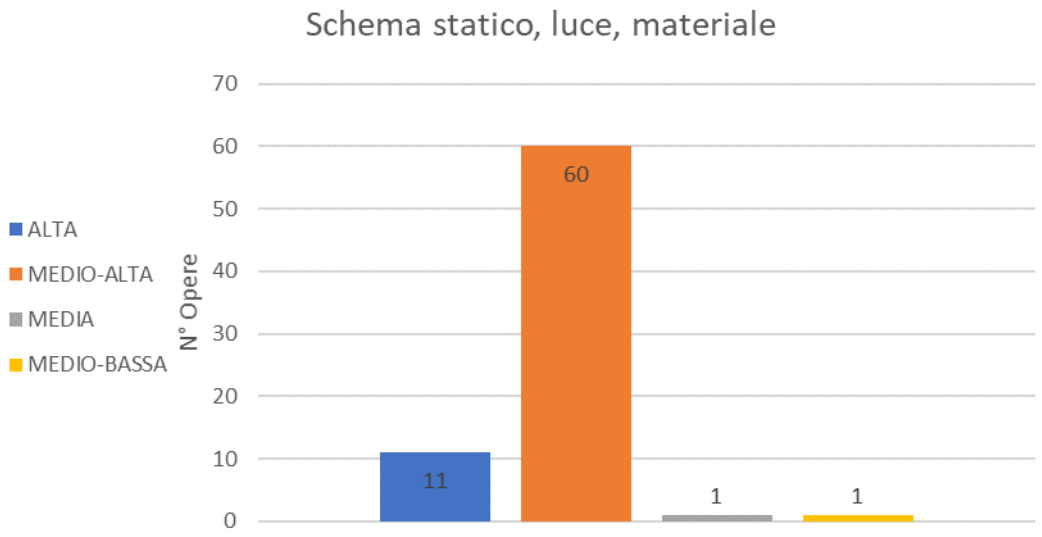


Fig. 2.16 – Suddivisione delle opere per schema statico, luce e materiale

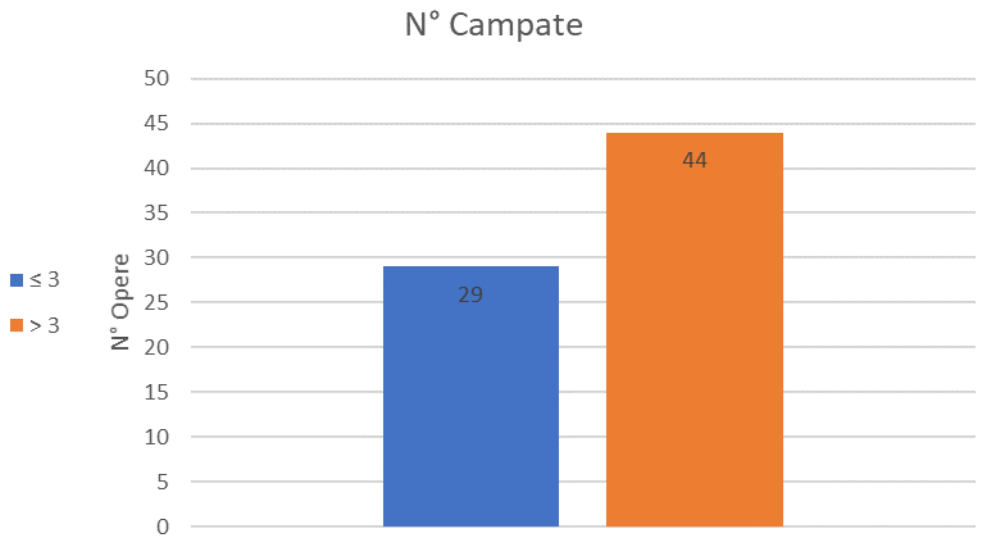


Fig. 2.17 – Suddivisione delle opere per numero di campate

I dati ottenuti sono stati poi combinati insieme per ottenere una classificazione finale comprensiva di tutte le variabili elencate.

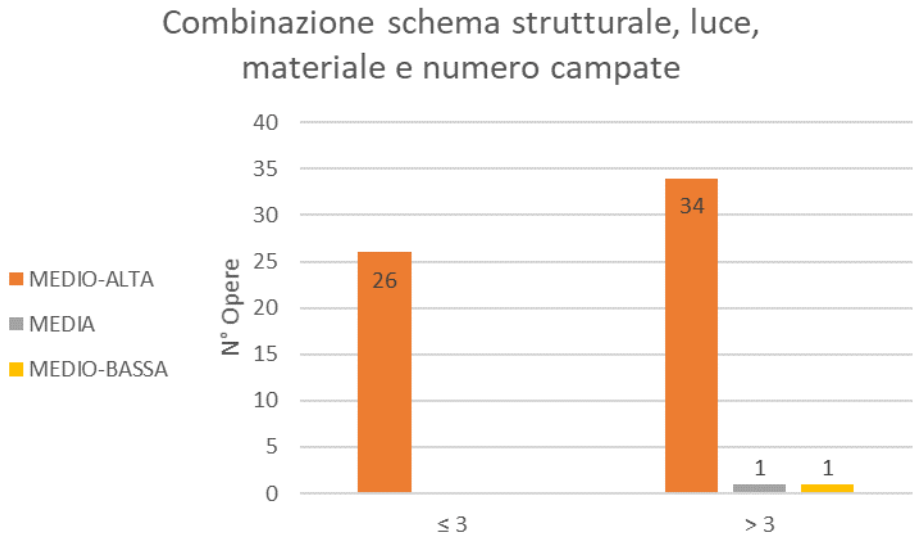


Fig. 2.18 – Combinazione dei dati di schema strutturale, luce e materiale con quelli relativi al numero di campate

Da questo grafico sono stati esclusi i ponti che rientravano già, prima della combinazione, in classe Alta, sia per numero di campate maggiore di 3 che minore o uguale a 3. Delle 60 opere che nel grafico di Fig. 2.16 appartenevano alla classe Medio-Alta, 34 sono caratterizzate da un numero di campate maggiore di 3 e finiranno, di conseguenza, in classe Alta. Si riporta, quindi, un grafico riassuntivo dei risultati ottenuti.

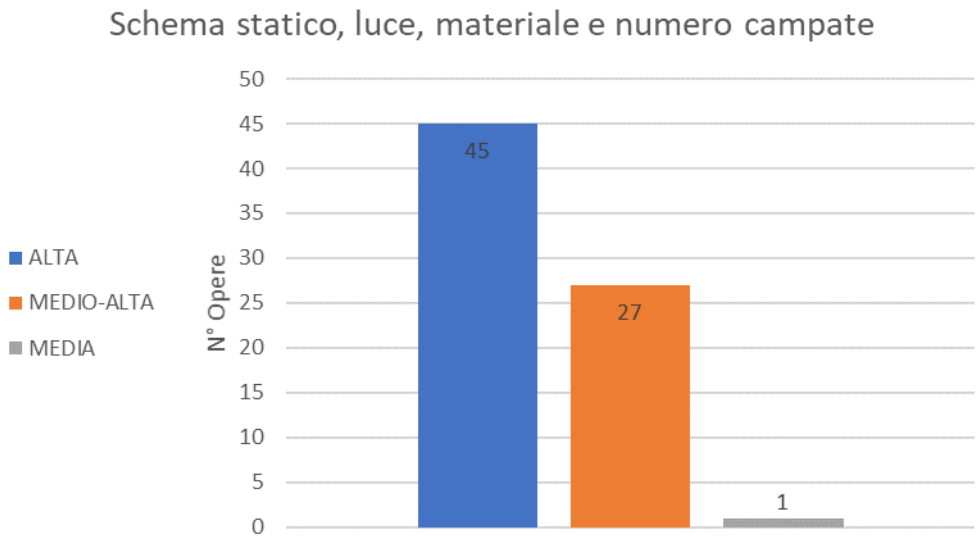


Fig. 2.19 – Suddivisione finale delle opere per schema statico, luce, materiale e numero di campate

Si evidenzia che, salvo un ponte che si colloca in classe Media, tutti gli altri entrano in classe Alta o Medio-Alta. È necessario sottolineare, come si può osservare anche dallo schema logico mostrato in Fig. 2.13, che tutti i casi in cui la classe derivante dallo schema statico, materiale e luce risulta essere Alta o Medio-Alta, conducono indistintamente alla stessa classe di vulnerabilità, rendendo indifferente, ai fini della valutazione, l'appartenenza all'una o all'altra classe. Sulla base di questa considerazione e immaginando che qualsiasi livello di difettosità sia possibile per ogni singola opera, i due parametri secondari, ossia la rapidità di evoluzione del degrado e le norme di progettazione, assumono in realtà un significato rilevante. Di seguito si illustra l'effetto dei suddetti parametri sulla vulnerabilità.

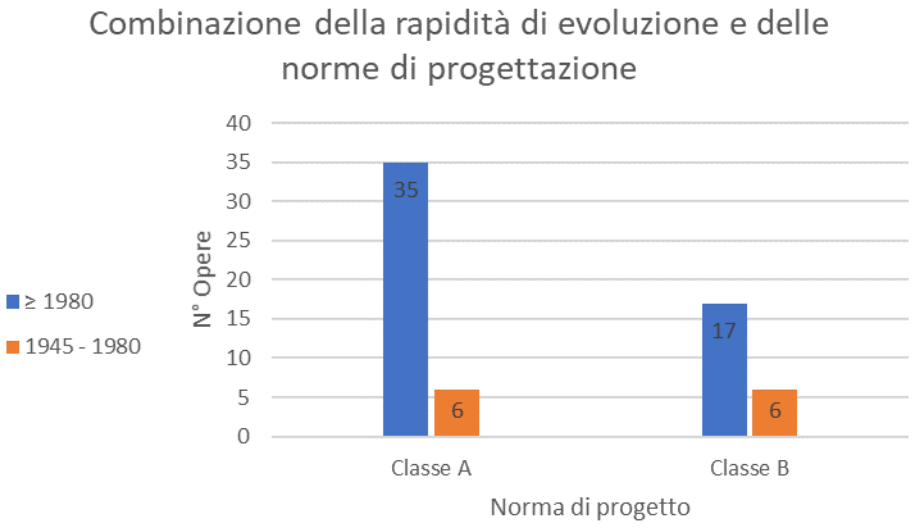


Fig. 2.20 – Combinazione dei dati relativi alla rapidità di evoluzione del degrado e della norma di progettazione

Riassumendo i valori ottenuti dal grafico, si può concludere che 35 delle opere studiate subiranno un incremento del livello di difettosità sia per rapidità di evoluzione del degrado sia per norma, 17 solo per rapidità di evoluzione del degrado, 6 solo per norma e altre 6 non avranno incrementi della difettosità. Sovrapponendo queste informazioni con il percorso logico mostrato in Fig. 2.13 e, alla luce delle ipotesi sopra descritte, è possibile concludere che:

- 35 opere saranno in classe Alta o Medio-Alta;

- 17 opere saranno in classe Alta, Medio-Alta o Media;
- 6 opere saranno in classe Alta, Medio-Alta o Medio-Bassa;
- 6 opere saranno in classe Alta, Medio-Alta, Media o Medio-Bassa.

2.2.3 Esposizione strutturale e fondazionale

L'esposizione è una rappresentazione dei possibili effetti che si avrebbero a seguito di un crollo strutturale di un ponte. Nelle Linee Guida viene definita da un parametro principale, ossia il traffico medio giornaliero e la luce media delle campate, e da due parametri secondari, che sono la presenza o meno di alternative stradali e la tipologia di ente scavalcato.

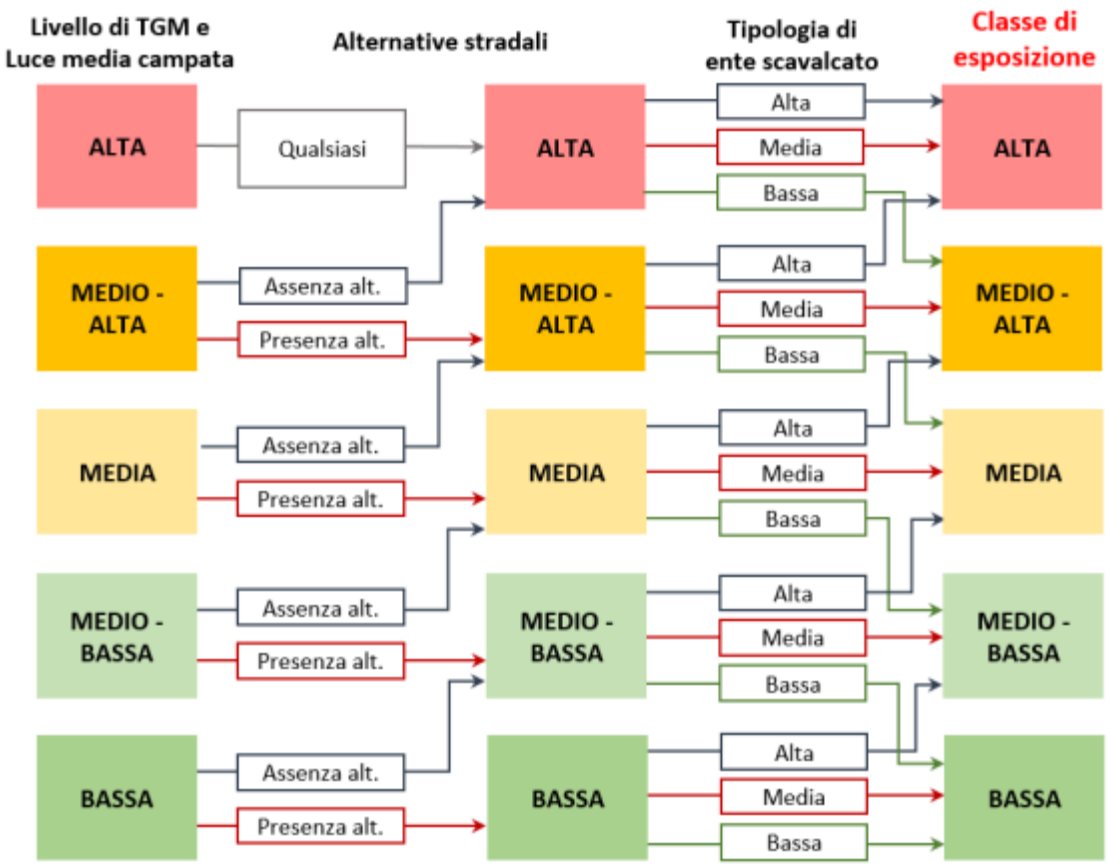


Fig. 2.21 – Flusso logico per la determinazione della classe di esposizione strutturale e fondazionale (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

In ultimo, viene aggiunto anche il possibile trasporto di merci pericolose, che non entra a far parte direttamente dello schema logico presentato ma funge da elemento di discrimine per decidere un ordine di priorità fra opere appartenenti allo stesso livello di esposizione. In questa sede, tale informazione è stata completamente trascurata sia perché irrilevante ai fini dello studio, sia perché è un dato che solo l'ente gestore può fornire, e nella fattispecie non era noto.

Passando a descrivere i vari parametri, riguardo al traffico medio giornaliero si può dire che sicuramente l'esposizione sarà tanto più elevata quanto maggiore risulta il volume di traffico transitante. A questo si aggiunge la luce media delle campate poiché, una campata mediamente più lunga implica anche un maggiore rischio a cui l'utente della strada è esposto (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). Secondo le Linee Guida la suddivisione per luce media delle campate avviene nel rispetto delle seguenti dimensioni:

- **Grande luce**: ponti con luce media maggiore di 50 m;
- **Media luce**: ponti con luce media maggiore di 20 m e non superiore a 50 m;
- **Piccola luce**: ponti con luce media minore o uguale a 20 m.

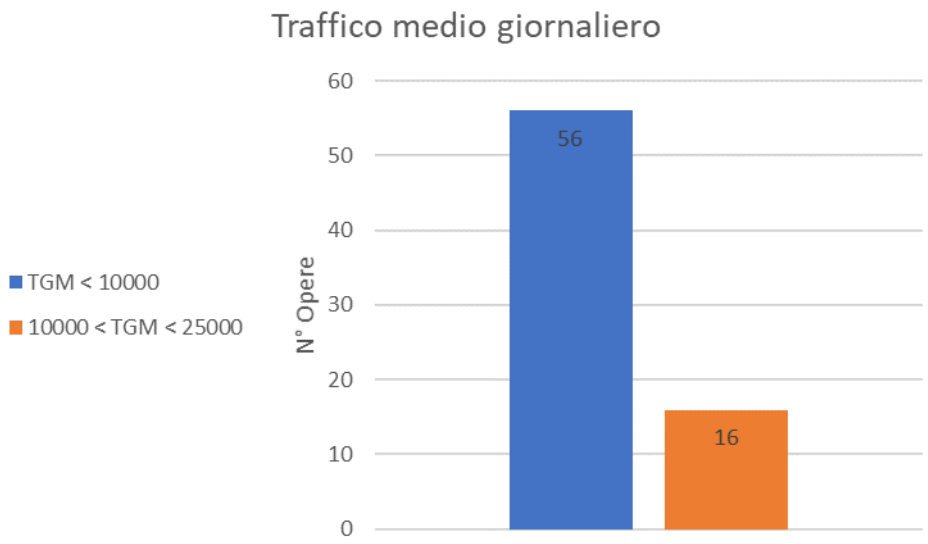


Fig. 2.22 – Suddivisione delle opere per TGM

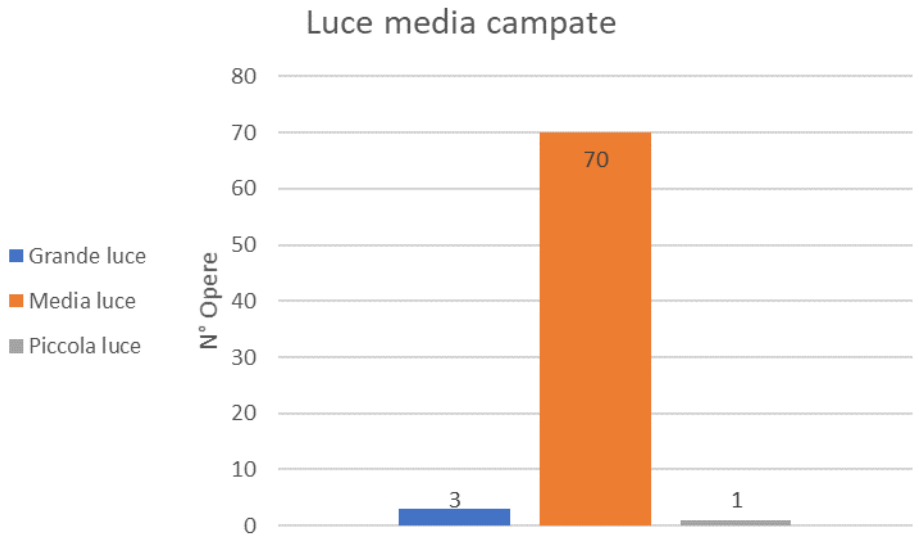


Fig. 2.23 – Suddivisione delle opere per luce media della campata

Combinando i dati appena mostrati secondo quanto previsto nella seguente tabella si raggiungono i livelli del primo passo del flusso logico.

Tab. 2.3 – Livello di traffico medio giornaliero e luce media della campata del ponte (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

	Livello di TGM		
Luce media della campata	**Alta**	**Media**	**Bassa**
Grande luce	Alta	Medio-Alta	Media
Media luce	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa
Piccola luce	Media	Medio-Bassa	Bassa

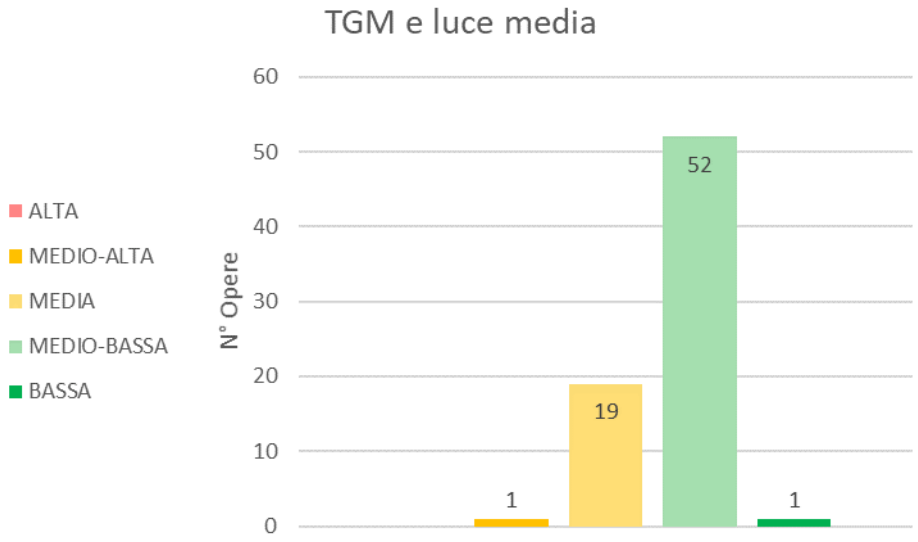


Fig. 2.24 – Risultati del primo passo del flusso logico per la determinazione della classe di esposizione

I risultati appena trovati vengono modificati in funzione delle alternative stradali dato che, la loro presenza o meno, influenza la classe di esposizione, rispettivamente, lasciandola invariata o aumentandola. Ovviamente, la presenza è intesa in maniera più globale, per cui non basta un'alternativa geografica ma occorre anche valutarne l'adeguatezza, in termini di costi, tempo e distanze (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). In merito alle alternative stradali, bisogna specificare che in questo lavoro il dato è stato ipotizzato, non essendo direttamente disponibile, considerando che tutte le opere appartenenti a strade extraurbane principali non abbiano alternative stradali, viceversa per quelle che sono a servizio di strade secondarie.

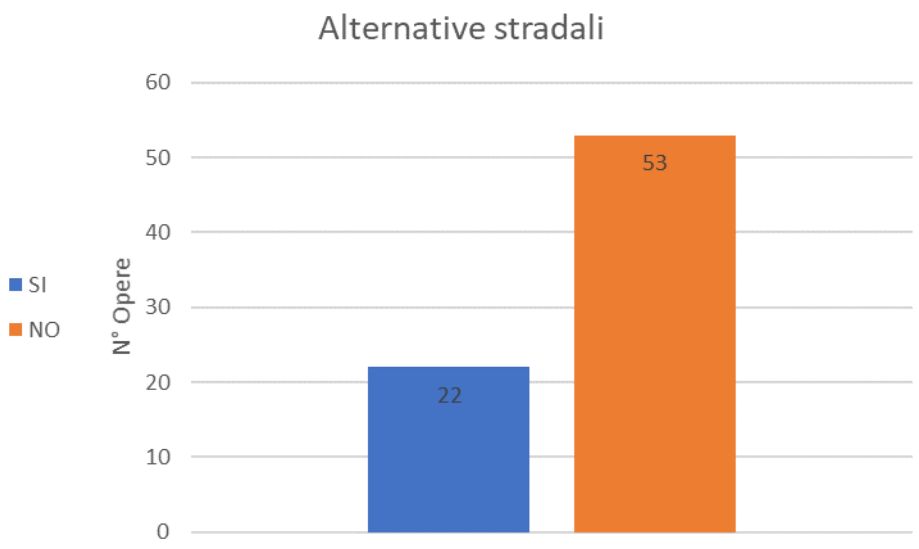


Fig. 2.25 – Suddivisione delle opere per presenza o meno di alternative stradali

Pertanto, si modificano nuovamente i livelli di esposizione come mostrato nel grafico seguente.

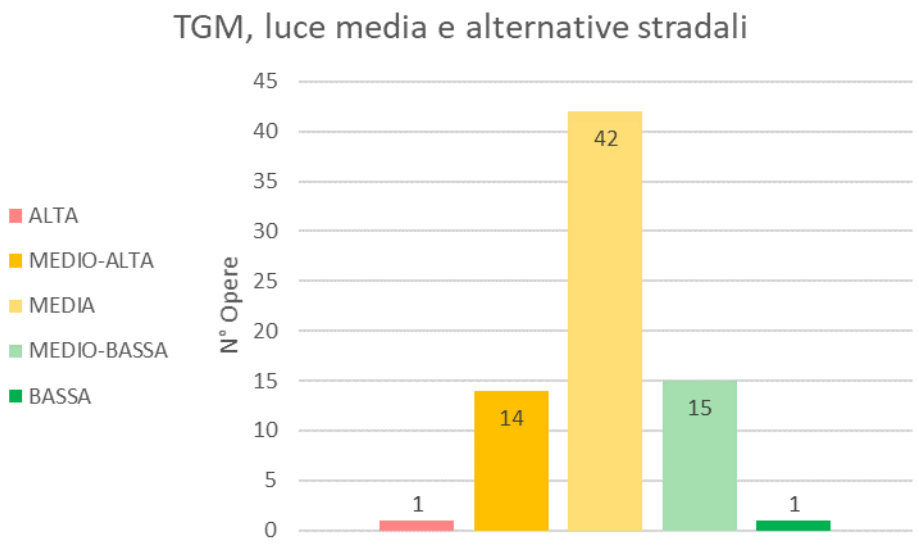


Fig. 2.26 – Risultati del secondo passo del flusso logico per la determinazione della classe di esposizione

Infine, quanto ottenuto finora, va affiancato alla tipologia di ente scavalcato che le Linee Guida divide sommariamente in tre casi:

- **Alto**: ente scavalcato soggetto ad affollamenti significativi e che svolge funzioni pubbliche e sociali essenziali (ferrovie, zone edificate, strade a viabilità primaria, etc.);
- **Medio**: ente scavalcato soggetto a normali affollamenti e che non svolge funzioni pubbliche e sociali essenziali (strade a viabilità secondaria, corsi d'acqua, laghi, etc.);
- **Basso**: ente scavalcato con presenza occasionale di persone (discontinuità naturali, depressioni del terreno, etc.).

La suddivisione delle opere per tipologia di ente scavalcato, ottenuta secondo le indicazioni appena descritte, viene riportata nel seguito.

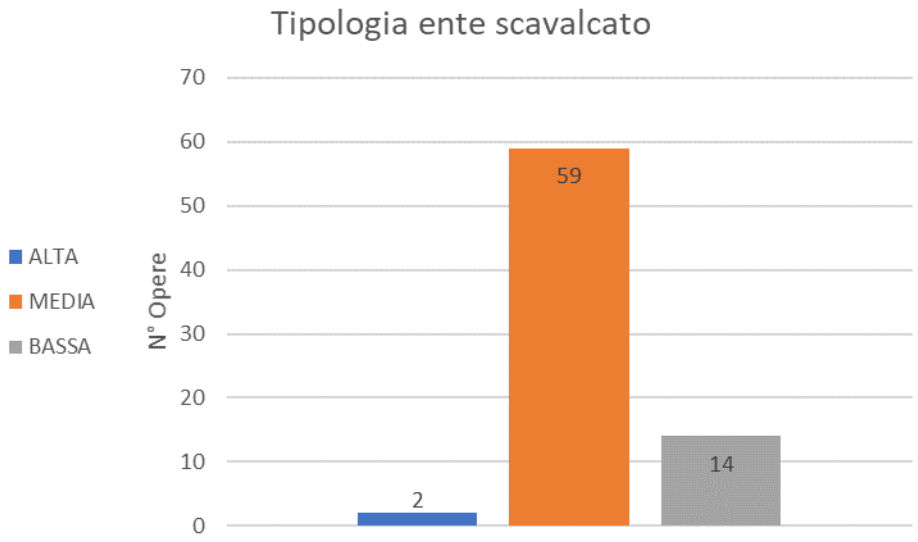


Fig. 2.27 – Suddivisione delle opere per ente scavalcato

A questo punto, combinando insieme tutte le informazioni si raggiunge la classe di esposizione.

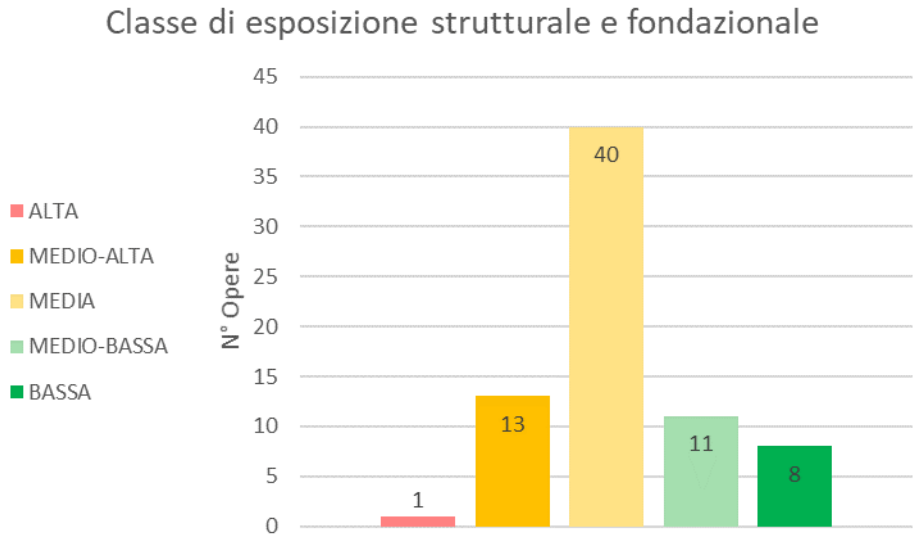


Fig. 2.28 – Definizione della classe di esposizione

2.2.4 Classe di attenzione strutturale e fondazionale

Le classi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione sono state infine combinate insieme, secondo le indicazioni riportate nelle Linee Guida, ottenendo la classe di attenzione strutturale e fondazionale. Si ricorda che in questo studio la classe di vulnerabilità, essendo il livello di difettosità incognito, non può essere definita univocamente, sicché, la classe di attenzione verrà indicata sotto forma di probabilità tenendo in considerazione i possibili livelli di vulnerabilità associati ad ogni opera. A titolo esplicativo, si riporta il ragionamento utilizzato per il calcolo delle probabilità delle classi di attenzione su una singola opera.

Si prende in esame l'Opera 5, questa è associata ad un livello di pericolosità Medio-Alto e un livello di esposizione Medio; per quanto concerne la vulnerabilità, l'opera esaminata rientra nel gruppo delle opere che possono avere un livello di vulnerabilità Alto o Medio-Alto. È possibile, quindi, scegliere una delle cinque tabelle presenti nel documento normativo che differiscono fra loro per classe di pericolosità.

Tab. 2.4 – Tabella per la determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale, in questo caso relativa alla classe di pericolosità Medio-Alta (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Classe di pericolosità ***MEDIO-ALTA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta			Alta		
	Medio-Alta	Alta		Medio-Alta		Media
	Media	Medio-Alta		Media		
	Medio-Bassa	Media			Medio-Bassa	
	Bassa	Media		Medio-Bassa		Bassa

Entrando nella tabella con la classe di esposizione viene intercettata una specifica colonna e, considerati anche i valori di vulnerabilità, si ha un caso in cui la CdA è Alta, ossia quando anche la vulnerabilità risulta Alta, e un caso in cui la CdA è Medio-Alta, con vulnerabilità anch'essa Medio-Alta; in questo modo la classe di attenzione risulta essere funzione della difettosità. Ipotizzando che ogni livello di difettosità sia equiprobabile, è possibile raggiungere le probabilità con cui possono verificarsi le due classi di attenzione. Facendo riferimento allo schema logico esposto in Fig. 2.13, si può notare che i livelli di difettosità che possono condurre ad una vulnerabilità Alta sono tre (Alto, Medio-Alto, Medio) mentre quelli che portano ad una vulnerabilità Medio-Alta sono due (Medio-Basso, Basso); pertanto, in linea con le ipotesi fatte, la probabilità che si verifichi la CdA Alta è pari al 60% mentre quella che si verifichi una CdA Medio-Alta è pari al 40%. Questo stesso ragionamento è stato esteso a tutte quante le opere che disponevano dei parametri necessari a raggiungere la classe di attenzione, pervenendo ai risultati mostrati nel seguito.

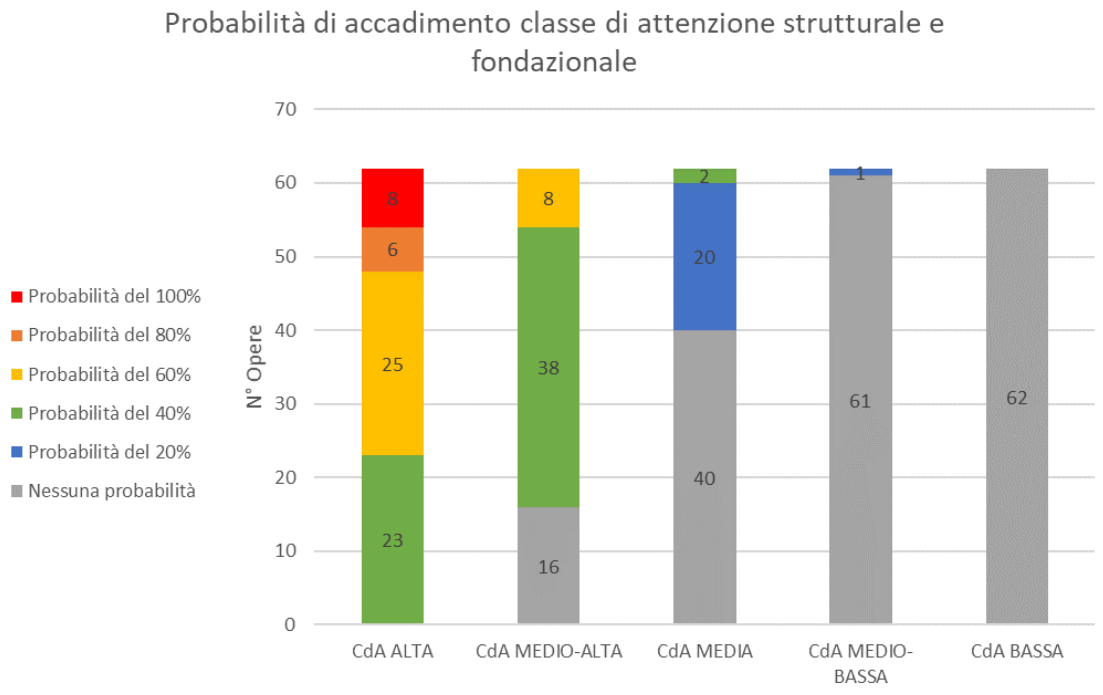


Fig. 2.29 – Probabilità di accadimento delle classi di attenzione strutturale e fondazionale

Innanzitutto, è da notare che le opere che raggiungono la classificazione del rischio sono 62 sulle 75 analizzate e questo è dovuto alla mancanza di informazioni che, per 13 opere, non permette di concludere la definizione delle classi di pericolosità, vulnerabilità o di esposizione. Riassumendo i risultati del grafico, si osserva che tutte le 62 opere possono raggiungere la CdA Alta (8 sono sicuramente in Alta, 6 con probabilità del 80%, 25 con probabilità del 60% e 23 con probabilità del 40%), 46 possono raggiungere la CdA Medio-Alta (8 con probabilità del 60% e 38 del 40%), 22 possono raggiungere la CdA Media (2 con probabilità del 40% e 20 del 20%), solo 1 raggiunge la CdA Medio-Bassa con probabilità del 20%, nessuna opera può avere una CdA Bassa. In linea generale, è evidente che le probabilità di accadimento si abbassano insieme alla CdA e questo implica che le classi di rischio più gravose sono anche quelle che più facilmente possono verificarsi. Le probabilità calcolate per ogni singola opera sono riportate in allegato[4].

[4] Allegato A, pp. 121-122

2.2.5 Pericolosità sismica

I parametri utilizzati per pervenire alla classe di pericolosità sismica mettono in evidenza le potenzialità del verificarsi di un evento sismico e l'entità dell'evento stesso. In pratica, le Linee Guida considerano l'accelerazione di picco al suolo, la categoria topografica e la categoria di sottosuolo, combinandoli come mostrato nel flusso logico.

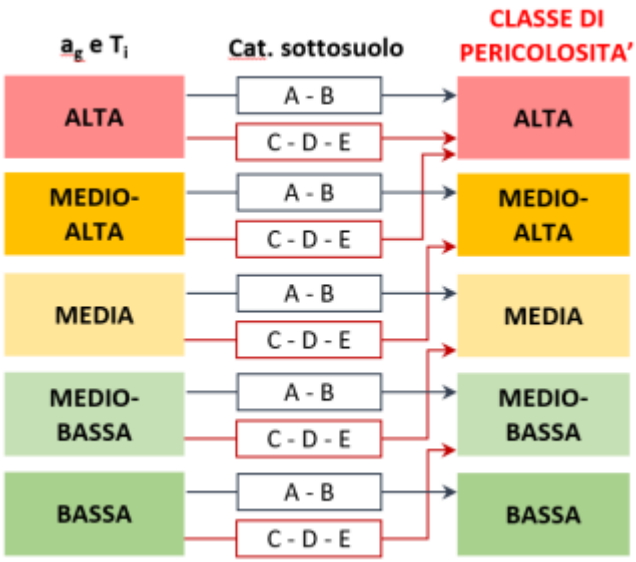


Fig. 2.30 – Flusso logico per la determinazione della classe di pericolosità sismica (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

L'accelerazione di picco al suolo deve essere calcolata, come descritto nel testo delle Linee Guida, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli rigidi (cat. A). Qui, l'accelerazione è stata calcolata mediante il programma *"SpettriNTC"* fornito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e successivamente, i valori ottenuti, sono stati confrontati con le mappe di rischio sismico prodotte dall'INGV.

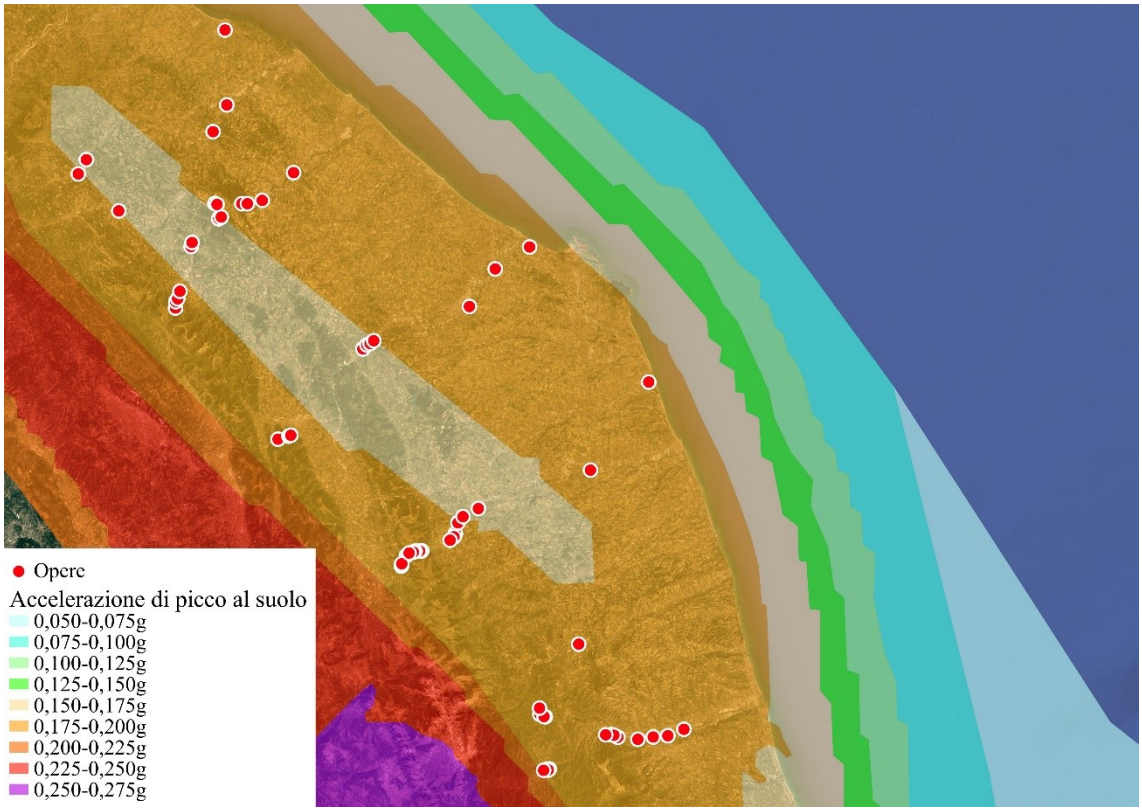


Fig. 2.31 – Mappa di sovrapposizione della localizzazione delle opere con le zone di rischio sismico

I valori confrontati appaiono similari e si nota, come visibile anche dalla mappa, che tutte le opere rientrano globalmente in due zone di sismicità, pertanto, le accelerazioni di picco al suolo sono comprese fra 0,15g e 0,2g.

Per la categoria topografica sono stati incrociati i dati derivanti dall'esame visivo della morfologia del sito svolta durante i sopralluoghi previsti al livello 0, e i dati studiati sovrapponendo le opere con una mappa avente curve di livello (Google Terrain), ovviamente stimati in maniera speditiva.

Fig. 2.32 – Esempio di mappa topografica utilizzata

Le due informazioni sono combinate insieme secondo la tabella seguente.

Tab. 2.5 – Classificazione sulla base dell'accelerazione di picco al suolo e categoria topografica (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

	T1, T2, T3	T4
$a_g \geq 0{,}25$ g	ALTA	ALTA
$0{,}15$ g $\leq a_g < 0{,}25$ g	MEDIO-ALTA	ALTA
$0{,}10$ g $\leq a_g < 0{,}15$ g	MEDIA	MEDIO-ALTA
$0{,}05$ g $\leq a_g < 0{,}10$ g	MEDIO-BASSA	MEDIA
$a_g < 0{,}05$ g	BASSA	MEDIO-BASSA

È necessario soffermarsi per osservare che, dati i valori di accelerazione che sono stati individuati, tutte le opere entrano nella seconda riga della tabella. Va aggiunto poi che, anche se le informazioni reperite sulla categoria topografica risultano essere particolarmente semplificate, è comunque poco frequente che un ponte possa appartenere ad una categoria T4, in particolar modo nel campione analizzato, dove le opere si sviluppano quasi tutte lungo le zone vallive. Allora, da queste considerazioni segue che tutte le opere appartengono ad un livello Medio-Alto.

Il livello appena trovato va poi modificato con la categoria di sottosuolo. In questo caso è stata ricavata in maniera speditiva utilizzando una mappa geolitologica.

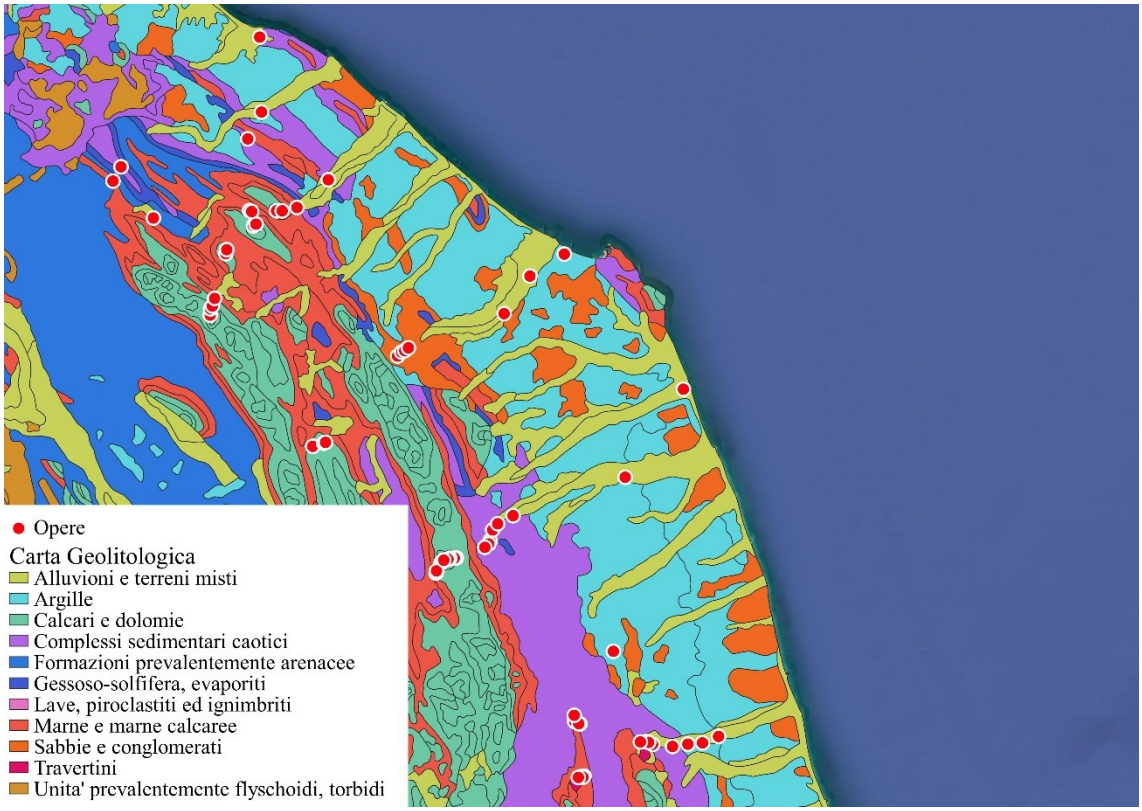


Fig. 2.33 – Sovrapposizione delle opere con carta geolitologica

In realtà, l'utilizzo di questa carta porta ad una forte approssimazione della categoria di sottosuolo poiché, a tal proposito, le NTC specificano che questa può essere ricavata una volta nota la stratigrafia del terreno entro i primi 30 m. Comunque, non disponendo di informazioni stratigrafiche dettagliate, si è scelto di dare validità a questo approccio semplificato. Nel dettaglio, si è assunto che tutte le opere ricadenti in zone alluvionali, argillose o sedimentarie appartenenti a tratti vallivi o basso-collinari, fossero identificabili con peggiori categorie di sottosuolo, ossia C-D-E, mentre le opere situate su terreni calcarei, marnosi o sedimentari appartenenti a tratti montuosi o alto-collinari, fossero da ricondurre a migliori categorie stratigrafiche, cioè A-B. I risultati ottenuti da questa suddivisione sono riportati in seguito.

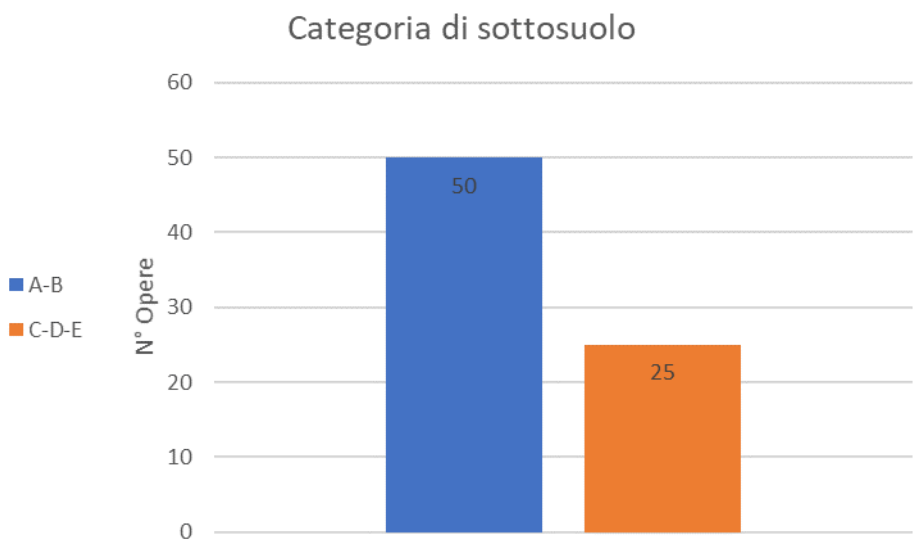


Fig. 2.34 – Suddivisione delle opere per categoria di sottosuolo

Infine, combinando tutti i risultati ottenuti si perviene alla classe di pericolosità sismica.

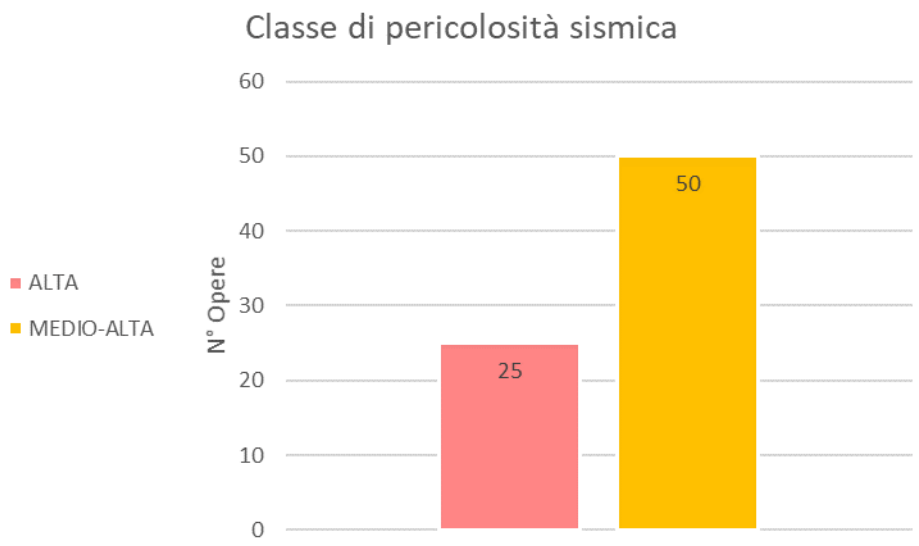


Fig. 2.35 – Classificazione della pericolosità sismica

Chiaramente, la suddivisione delle opere fra classe Alta e Medio-Alta ricalca quanto si ottiene anche dai risultati delle categorie di sottosuolo poiché è proprio questo a fare da discriminante, dato che per accelerazione e categoria topografica tutte le opere rimangono in classe Medio-Alta.

2.2.6 Vulnerabilità sismica

Così come accade per la vulnerabilità strutturale e fondazionale, tutti i parametri che influenzano la risposta strutturale dell'opera nei confronti del sisma, ne definiscono la relativa classe di vulnerabilità. Tali parametri sono: schema strutturale, luce e materiale, criteri di progettazione e livello di difettosità, i quali si incrociano fra loro secondo il seguente schema logico.

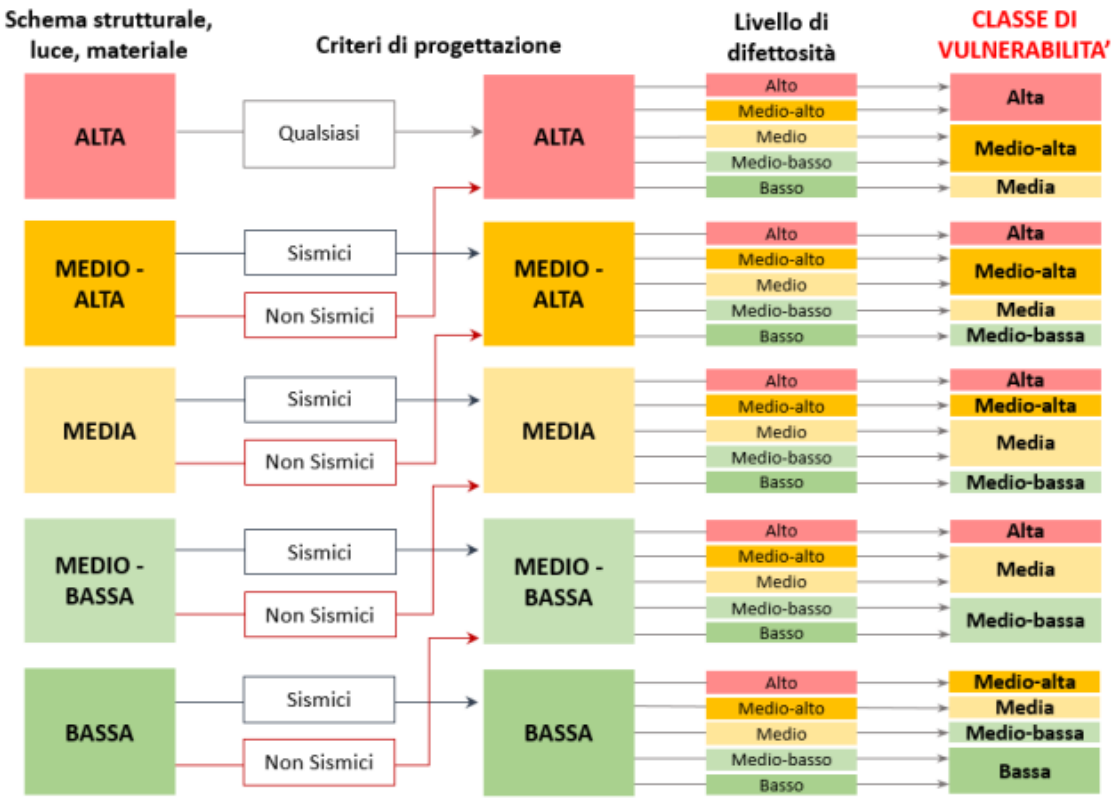


Fig. 2.36 – Flusso logico per la determinazione della classe di vulnerabilità sismica (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Il primo passaggio dello schema logico prevede l'analisi delle caratteristiche strutturali delle opere, quali, lo schema statico, la luce massima delle campate, il loro numero e il materiale utilizzato per costruire l'impalcato. A riguardo, il testo delle Linee Guida suggerisce che, qualora le opere presentino elementi particolarmente suscettibili alle azioni sismiche come, ad esempio, impalcati sghembi o in curva, pile a singola colonna o con altezza disuniforme, appoggi particolarmente soggetti a degrado (quali appoggi a pendolo interamente in metallo) o situazioni che determinano concentrazione degli sforzi

o moti rotazionali, il livello ricavato dalla Tab. 2.6 deve essere aumentato di un grado (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020). In merito a questa richiesta, data l'assenza di alcuni elementi descritti (appoggi soggetti a particolare degrado) e la difficoltà nell'individuarne alcuni altri (pile ad altezze disuniformi), si è scelto di fare riferimento solamente alla presenza di impalcati in curva e di pile a singola colonna.

Tab. 2.6 – Classificazione sulla base di schema statico, luce e materiale (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

		Schema isostatico		Schema iperstatico	
		L medio-piccola	**L elevata**	**L medio-piccola**	**L elevata**
C.A.	**Singola campata**	Media	Medio-alta	Bassa	Medio-bassa
	Multi-campata	Medio-alta	Alta	Medio-bassa	Media
C.A.P.	**Singola campata**	Media	Medio-alta	-	-
	Multi-campata	Medio-alta	Alta	Medio-bassa	Media
Muratura	**Singola campata**	-	-	Bassa	Medio-bassa
	Multi-campata	-	-	Medio-bassa	Media
Acciaio	**Singola campata**	Medio-bassa	Medio-bassa	Bassa	Bassa
	Multi-campata	Media	Media	Medio-bassa	Medio-bassa

Relativamente alla tabella appena esposta si specifica che per luci elevate si intendono quelle maggiori di 20 m mentre, per luci medio-piccole, quelle minori o uguali a 20 m.

Nel grafico seguente, invece, viene mostrata la suddivisione delle opere sulla base della presenza di elementi critici dal punto di vista sismico.

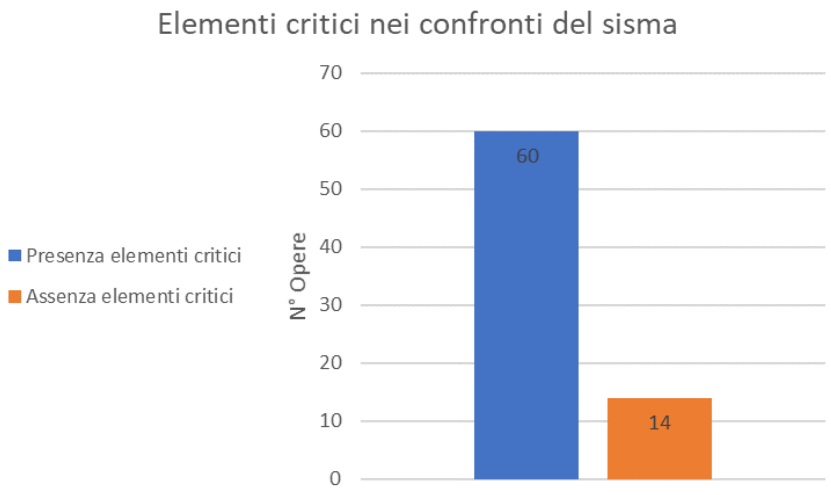


Fig. 2.37 – Suddivisione delle opere per presenza di elementi critici nei confronti del sisma

I valori restituiti dalla Tab. 2.6 e corretti con i risultati del grafico precedente, relativi alla presenza di elementi critici, sono riportati in Fig. 2.37.

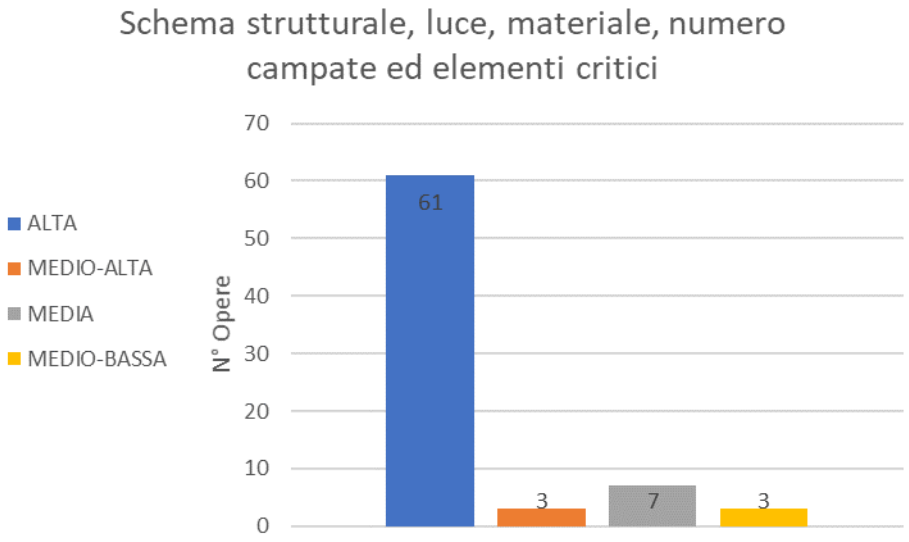


Fig. 2.38 – Suddivisione delle opere in funzione di schema statico, luce, materiale, numero di campate ed elementi critici

Il numero elevato di ponti ricadenti nel livello Alto è giustificabile dalla frequente presenza di impalcati di tipo isostatico. Infatti, nel caso in cui si verifichi un terremoto, la formazione di zone critiche porterà le opere direttamente al collasso senza lo sfruttamento di alcuna capacità dissipativa.

Per quanto riguarda i criteri di progettazione, il caso in cui le opere siano state progettate in assenza di normative antisismiche ne incrementa il livello di vulnerabilità. Occorre infatti precisare che fino al 2003 le azioni sismiche venivano considerate solamente nei Comuni che erano stati definiti a rischio sismico, titolo che veniva rilasciato esclusivamente a seguito di forti terremoti nell'area. Soltanto dopo tale data l'intero territorio italiano fu definito sismico, con la formulazione di normative specifiche che, pertanto, dovevano essere applicate su tutte le opere ricadenti su suolo italiano. Ai fini del presente lavoro, si è scelto di considerare antisismici i ponti realizzati in seguito all'ingresso del Comune di appartenenza nella zona di rischio sismico.

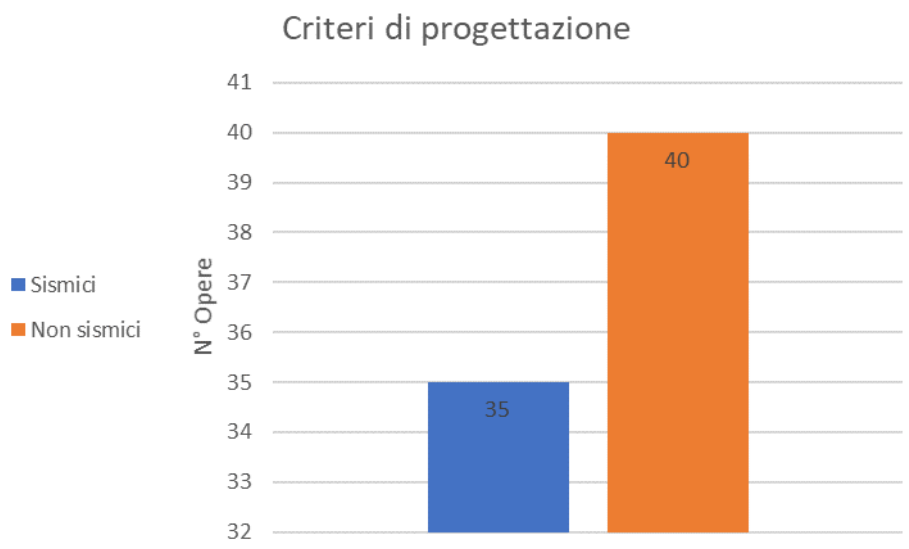


Fig. 2.39 – Suddivisione delle opere per criteri di progettazione

Infine, combinando i risultati relativi ai criteri di progettazione con quelli ricavati dalla suddivisione per schema strutturale, luce, numero di campate, materiale e presenza di elementi critici, si raggiunge il secondo step del flusso logico.

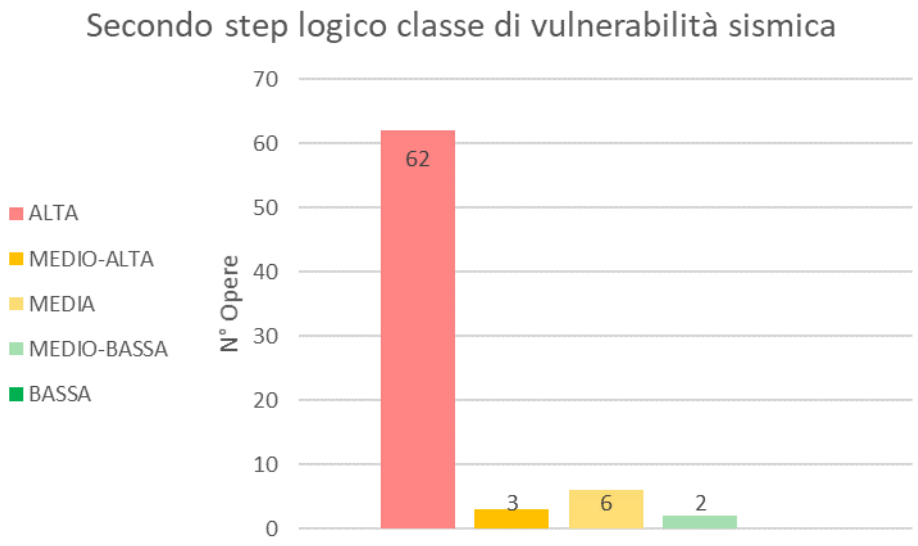


Fig. 2.40 – Definizione della vulnerabilità sismica al secondo passo dello schema logico

Dato che il livello di difettosità è incognito, non si può raggiungere un valore definito di classe di vulnerabilità, ma si possono comunque effettuare delle stime sulla base di quanto mostrato nello schema logico di Fig. 2.35:

- Le 62 opere che nel secondo step sono in classe Alta avranno probabilità del 40% di finire in vulnerabilità finale Alta, 40% in vulnerabilità finale Medio-Alta e 20% in vulnerabilità finale Media;

- Le 3 opere che nel secondo step sono in classe Medio-Alta avranno probabilità del 20% di finire in vulnerabilità finale Alta, 40% in vulnerabilità finale Medio-Alta, 20% in vulnerabilità finale Media e 20% in vulnerabilità finale Medio-Bassa;

- Le 6 opere che nel secondo step sono in classe Media avranno probabilità del 20% di finire in vulnerabilità finale Alta, 20% in vulnerabilità finale Medio-Alta, 40% in vulnerabilità finale Media e 20% in vulnerabilità finale Medio-Bassa;

- Le 2 opere che nel secondo step sono in classe Medio-Bassa avranno probabilità del 20% di finire in vulnerabilità finale Alta, 40% in vulnerabilità finale Media e 40% in vulnerabilità finale Medio-Bassa.

2.2.7 Esposizione sismica

La classe di esposizione sismica ricalca esattamente lo stesso percorso di quella strutturale e fondazionale aggiungendo soltanto un ulteriore parametro, ossia la strategicità dell'opera, come si mostra nel seguito.

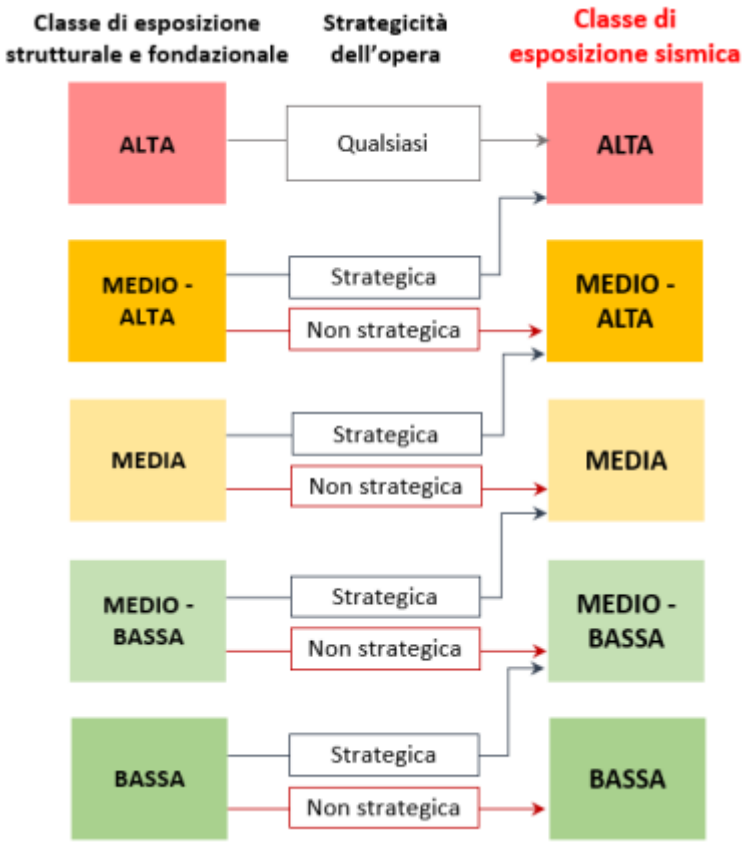


Fig. 2.41 – Flusso logico per la determinazione della classe di esposizione sismica (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

In seguito ad un evento sismico, assumono fondamentale importanza tutti i ponti che sono a servizio di strade di collegamento che devono essere utilizzate dai mezzi di soccorso per fronteggiare la situazione di emergenza. Per questo motivo la strategicità dell'opera diventa un ulteriore parametro nella classificazione dell'esposizione incrementandone, se del caso, il valore finale. L'ipotesi scelta per tale parametro è analoga a quella scelta in precedenza per le alternative stradali, ossia tutte le opere appartenenti a strade extraurbane principali sono da considerare strategiche mentre, sono non strategiche le opere ricadenti su strade secondarie. Se ne mostra quindi la suddivisione ottenuta.

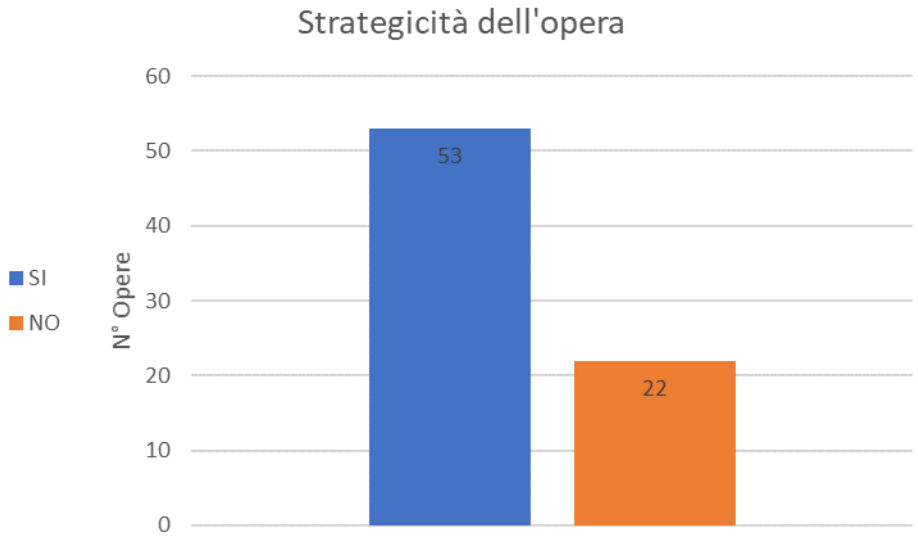


Fig. 2.42 – Suddivisione delle opere per strategicità

In ultimo, dalla combinazione di tali valori con quelli già ottenuti per la classe di esposizione strutturale e fondazionale[5], si raggiunge la classe di esposizione sismica.

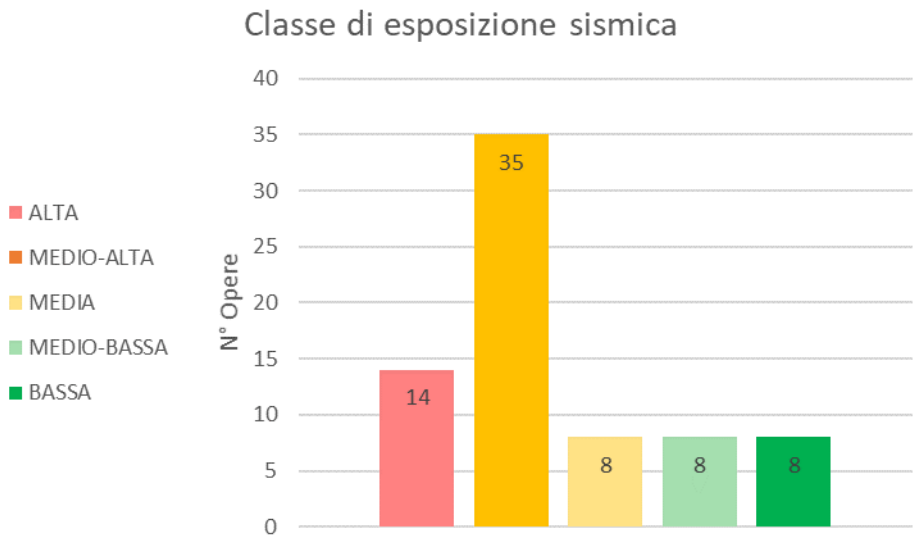


Fig. 2.43 – Classe di esposizione sismica

[5] Capitolo 2, par. 2.2.3, Fig. 2.28, p. 52

Si può osservare che, rispetto a quella strutturale e fondazionale, l'esposizione sismica tende mediamente ad aumentare in linea con la presenza di una maggioranza di opere che risultano avere funzioni strategiche.

2.2.8 Classe di attenzione sismica

Esattamente come per la classe di attenzione strutturale e fondazionale, i risultati relativi a pericolosità, vulnerabilità ed esposizione sismica vengono combinati per raggiungere la CdA sismica. Si ricorda nuovamente che, in questo lavoro, pericolosità ed esposizione risultano completamente definiti mentre la vulnerabilità resta legata al livello di difettosità incognito, per cui sarà possibile effettuare solo delle stime probabilistiche della classe di attenzione che può essere raggiunta. Infine, anche in questo caso vengono dettagliate le modalità di calcolo delle probabilità per una singola opera, con lo scopo di illustrare il ragionamento seguito.

Si prende la stessa opera studiata per la classe di attenzione strutturale e fondazionale, ovvero l'Opera 5. Dal punto di vista sismico il ponte presenta un livello di pericolosità Medio-Alto, un livello di esposizione Medio-Alto ed una vulnerabilità al secondo step, cioè senza difettosità, Alta, che corrisponde ad una probabilità di vulnerabilità finale pari al 40% in Alta, 40% in Medio-Alta e 20% in Media. Con queste informazioni è possibile entrare nelle tabelle per la definizione della CdA, che corrispondono esattamente con quelle utilizzate per il calcolo della CdA strutturale e fondazionale.

Tab. 2.7 – Determinazione della classe di attenzione sismica in funzione della classe di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Classe di pericolosità ***MEDIO-ALTA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta			Alta		
	Medio-Alta	Alta		Medio-Alta		Media
	Media	Medio-Alta		Media		
	Medio-Bassa	Media			Medio-Bassa	
	Bassa	Media		Medio-Bassa		Bassa

Incrociando i valori della colonna individuata dall'esposizione con i possibili valori della vulnerabilità si trova che la CdA sismica finale potrà essere in un caso Alta, se la

vulnerabilità è Alta, o in due casi Medio-Alta, sia quando la vulnerabilità è Medio-Alta sia quando essa è Media. Come si può vedere dallo schema logico della classe di vulnerabilità (Fig. 2.35), i livelli di difettosità che portano ad una vulnerabilità Alta sono due e quelli che portano ad una vulnerabilità Medio-Alta o Media sono tre, da cui segue che, considerando sempre ogni livello di difettosità equiprobabile, la CdA Alta ha una probabilità del 40% mentre la CdA Medio-Alta una probabilità del 60%. Estendendo il ragionamento a tutte le opere si ottengono i seguenti risultati.

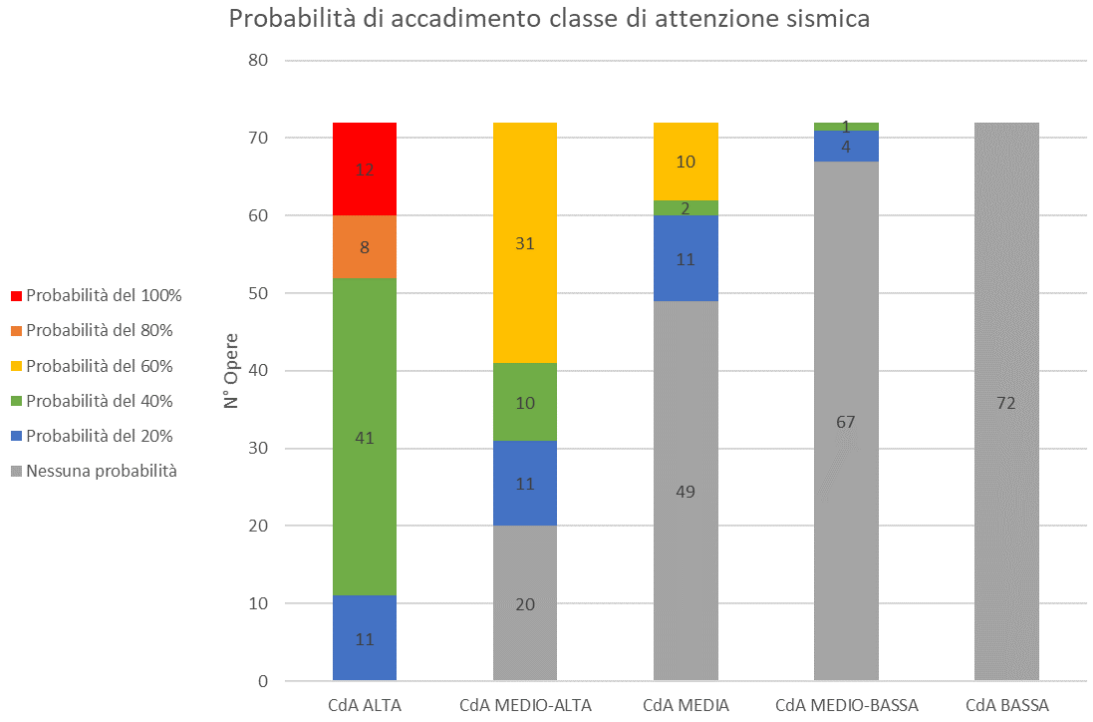


Fig. 2.44 – Probabilità di accadimento delle classi di attenzione sismiche

In primo luogo, si evidenzia che in questo caso sono 72 su 75 le opere che hanno raggiunto la classificazione del rischio sismico, quindi gran parte delle informazioni richieste dalle Linee Guida nel merito sono state ricavate compiutamente. Inoltre, possono essere tratte le seguenti conclusioni: tutte le 72 opere possono entrare in CdA Alta (12 lo sono sicuramente, 8 hanno probabilità dell'80%, 41 del 40% e 11 del 20%), 52 opere entrano in CdA Medio-Alta (31 con probabilità del 60%, 10 del 40% e 11 del 20%), 23 opere entrano in CdA Media (10 con probabilità del 60%, 2 del 40% e 11 del 20%), 5 opere entrano in CdA Medio-Bassa (1 con probabilità del 40% e 4 del 20%) e nessuna opera in CdA Bassa. Si osserva che il numero delle opere diminuisce al diminuire della classe di

attenzione, così pure le probabilità di accadimento diventano sempre più piccole, perciò, le classi di attenzione più critiche saranno probabilmente anche le più frequenti.

2.3 Valutazione della classe di attenzione globale e considerazioni statistiche dei risultati

La prima considerazione che si vuole effettuare è sulla differenza fra le opere che raggiungono la classe di attenzione strutturale e fondazionale rispetto a quelle che raggiungono quella sismica. Nel primo caso sono 62 le opere risultanti mentre nel secondo sono 72. Sebbene in entrambe le valutazioni siano state fatte ipotesi sui dati incompleti, per la parte strutturale e fondazionale la mancanza di informazioni coinvolgeva dei dati fondamentali come l'anno di realizzazione, lo schema statico o la tipologia strutturale. Su questi parametri non sono state formulate delle ipotesi in quanto esse potrebbero portare alla definizione di dati poco attendibili. Pertanto, questa circostanza spiega la discrepanza fra i due valori.

Si prosegue, a questo punto, con la valutazione della classe di attenzione globale delle opere, che è però legata anche alla conoscenza del rischio idraulico e frane. Non essendo stata approfondita, nel presente studio, la parte relativa al rischio idrogeologico, questa diventa una seconda incognita, in aggiunta al livello di difettosità. Partendo dai risultati ottenuti in precedenza sulla CdA strutturale e fondazionale e sulla CdA sismica e, prendendo a riferimento la stessa Opera 5, si illustrano le considerazioni fatte per trovare la CdA globale. L'opera in questione ha probabilità del 60% di essere in classe Alta e del 40% in Medio-Alta per quanto riguarda la CdA strutturale e fondazionale, mentre per quella sismica le probabilità sono del 40% di essere in Alta e del 60% in Medio-Alta. Alla luce di queste informazioni si possono individuare le tabelle da seguire per trovare la CdA complessiva.

Tab. 2.8 e 2.9 – Combinazioni delle CdA per la determinazione della classe di attenzione complessiva (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Classe di attenzione strutturale/fondazionale ***ALTA***

		Classe di attenzione idraulica e frane				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di attenzione sismica	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta				
	Media	Alta				
	Medio-Bassa	Alta				
	Bassa	Alta				

Classe di attenzione strutturale/fondazionale ***MEDIO - ALTA***

		Classe di attenzione idraulica e frane				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di attenzione sismica	Alta	Alta		Medio-Alta		
	Medio-Alta	Alta	Medio-Alta			Media
	Media	Medio-Alta			Media	
	Medio-Bassa	Medio-Alta		Media		
	Bassa	Medio-Alta	Media			

La prima tabella, così come specificato dalle Linee Guida, indica che qualora la CdA strutturale e fondazionale sia Alta, allora la CdA complessiva sarà sempre Alta, indipendentemente dai valori di quella sismica e idrogeologica. Nell'esempio che si sta proponendo, questo significa che la CdA complessiva ha già una probabilità del 60% di essere in Alta, valore che deriva proprio dalla CdA strutturale. Il restante 40% che ricade in Medio-Alta, invece, può essere associato ad una CdA sismica Alta o Medio-Alta. È quindi necessario passare al calcolo delle probabilità composte e, considerati i due eventi indipendenti, la probabilità finale sarà il prodotto delle probabilità dei due eventi separati. Detti P(A) la probabilità della CdA strutturale e P(B) la probabilità della CdA sismica, il calcolo effettuato viene riportato nel seguito:

$$CdA\ Si.Alta: P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) = 0{,}4 \cdot 0{,}4 = 0{,}16 = 16\%$$

$$CdA\ Si.Medio\ Alta: P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) = 0{,}4 \cdot 0{,}6 = 0{,}24 = 24\%$$

In poche parole, in relazione alle probabilità della CdA strutturale e sismica, si ottiene una probabilità del 16% di entrare nella prima riga e una del 24% di entrare nella seconda riga della Tab. 2.9. In ogni riga, la CdA complessiva dipende dal valore della classe di

attenzione idrogeologica e si può osservare che nella prima riga si hanno due casi in cui essa risulta Alta e tre in cui risulta Medio-Alta mentre, nella seconda riga, si ha un caso in cui la CdA risulta Alta, tre in cui risulta Medio-Alta ed uno in cui risulta Media. Quindi, considerando che la CdA idrogeologica sia equiprobabile e chiamandola P(C), si sfrutta nuovamente il calcolo delle probabilità composte, stavolta dipendenti, come nel seguito:

$$CdA\ Si.Alta \begin{cases} CdA\ Alta: P(B \cap C) = P(A \cap B) \cdot 2P(C) = 0{,}16 \cdot 0{,}4 = 6{,}4\% \\ CdA\ Medio\ Alta: P(B \cap C) = P(A \cap B) \cdot 3P(C) = 0{,}16 \cdot 0{,}6 = 9{,}6\% \end{cases}$$

$$CdA\ Si.Medio\ Alta \begin{cases} CdA\ Alta: P(B \cap C) = P(A \cap B) \cdot P(C) = 0{,}24 \cdot 0{,}2 = 4{,}8\% \\ CdA\ Medio\ Alta: P(B \cap C) = P(A \cap B) \cdot 3P(C) = 0{,}24 \cdot 0{,}6 = 14{,}4\% \\ CdA\ Media: P(B \cap C) = P(A \cap B) \cdot P(C) = 0{,}24 \cdot 0{,}2 = 4{,}8\% \end{cases}$$

Infine, tutti i valori ricavati vengono sommati insieme per trovare le probabilità totali della CdA complessiva:

$$CdA\ complessiva \begin{cases} Alta: 60\% + 6{,}4\% + 4{,}8\% = 71{,}2\% \\ Medio\ Alta: 9{,}6\% + 14{,}4\% = 24\% \\ Media: 4{,}8\% \end{cases}$$

In definitiva, quindi, le probabilità di accadimento della classe di attenzione complessiva per l'opera esaminata saranno: 71,2% in Alta, 24% in Medio-Alta e 4,8% in Media. Ripetendo le stesse operazioni su tutte le strutture del campione si raggiungono i seguenti risultati.

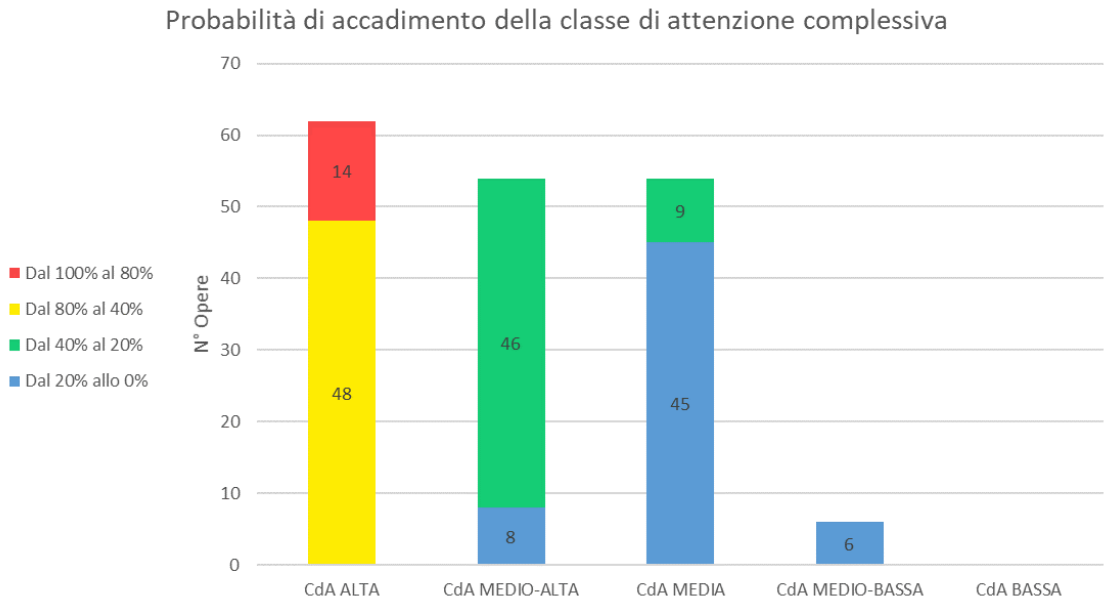


Fig. 2.45 – Probabilità di accadimento della CdA complessiva

Dai risultati ottenuti si osserva che, in linea con quanto già visto per la classe di attenzione strutturale e quella sismica, le probabilità di accadimento diminuiscono con la CdA. La classe di attenzione Alta è infatti quella che mostra probabilità maggiori, che vanno dal 100% al 40%, la Medio-Alta è composta principalmente da probabilità fra il 40% e il 20%, la Media si abbassa ancora ed è composta per lo più da probabilità inferiori al 20% e, i pochi casi che riescono a raggiungere la CdA Medio-Bassa hanno probabilità sempre inferiori al 20%.

Le probabilità appena ricavate sono state utilizzate nuovamente per calcolare la probabilità media che un'opera del campione ha di finire in ognuna delle cinque classi. È interessante notare che nel caso in cui i ponti appartenenti al campione possano essere considerati rappresentativi delle opere presenti all'interno del territorio marchigiano, allora le probabilità medie potrebbero essere estese a probabilità di accadimento generiche per le strutture esterne al campione analizzato. Si riportano in seguito i risultati ottenuti.

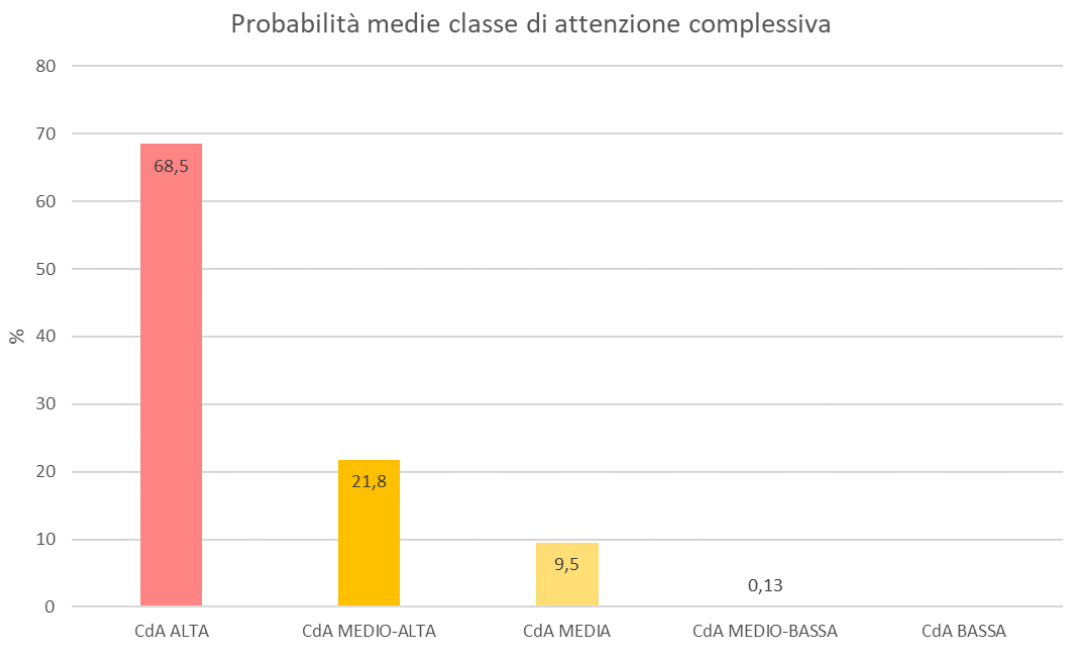


Fig. 2.46 – Probabilità di accadimento medie della CdA complessiva

Pertanto, si può concludere che le probabilità di accadimento medie sono:

- Del 68,5% di avere una CdA complessiva Alta;
- Del 21,8% di avere una CdA complessiva Medio-Alta;
- Del 9,5% di avere una CdA complessiva Media;
- Dello 0,13% di avere una CdA complessiva Medio-Bassa;
- Nessuna probabilità di ottenere una CdA complessiva Bassa

Capitolo 3
Definizione dettagliata della classe di attenzione per alcuni ponti appartenenti al campione

In questo capitolo vengono studiate nel dettaglio alcune delle opere appartenenti al campione analizzato in precedenza. Per queste opere è infatti disponibile anche il livello di difettosità precedentemente incognito, potendo quindi raggiungere una valutazione esatta delle classi di attenzione strutturale e sismica. Lo scopo di questa parte del lavoro è quello di mostrare nel dettaglio un'applicazione del metodo proposto dalle Linee Guida e, sulla base dei risultati ottenuti precedentemente, di confrontare le classi di attenzione esatte con le rispettive probabilità di accadimento. Va specificato che le opere vengono analizzate in parallelo nei vari livelli che compongono il metodo, fino al raggiungimento della classe di attenzione. Volendo rispettare l'anonimato delle opere, queste sono state identificate tramite un numero, rappresentativo della loro posizione all'interno della lista dei ponti del campione.

3.1 Localizzazione e censimento delle opere

Seguendo le indicazioni descritte dalle Linee Guida, il livello 0 porta alla definizione di tutti i parametri necessari alla localizzazione delle opere e, successivamente, al raggiungimento della loro classe di attenzione. Si specifica che, a tal fine, la raccolta delle informazioni è stata svolta sia mediante l'analisi della documentazione che è si è potuta reperire, sia tramite lo svolgimento di sopralluoghi. Questi ultimi, in particolare, hanno lo scopo di confermare ed integrare tutte le informazioni ricavate dallo studio della documentazione, ma sono anche necessarie a chiarire le modalità operative con le quali dovranno essere svolte le successive ispezioni di livello 1; ad esempio, possono essere determinate in questa fase le condizioni di accessibilità al sito, la necessità di sfalci nel caso di vegetazione infestante, la necessità di mezzi per poter raggiungere tutti gli elementi strutturali (by-bridge, piattaforme elevabili, ecc.). Si riporta in seguito una mappa che localizza geograficamente le opere in questione ed una tabella riassuntiva delle

sole informazioni fondamentali delle opere, in quanto tutti gli altri dati verranno poi dettagliati nel seguito durante la definizione della classe di attenzione.

Fig. 3.1 – Mappa per localizzazione delle opere studiate

Tab. 3.1 – Riepilogo delle principali informazioni ottenute nel livello 0

Livello 0 - Informazioni generali per il censimento					
N° Opera	Anno di costruzione	Tipologia strutturale	Materiale	Luce max campate [m]	n° campate
Opera 1	1970	Travate appoggiate	C.A.P.	33	1
Opera 8	1978	Cassone appoggiato con sella Gerber	C.A.P.	46	4
Opera 15	1983	Travi a cassone appoggiate	C.A.P.	33	3
Opera 55	1981	Travate appoggiate	C.A.P.	38	3
Opera 67	1996	Travate appoggiate	C.A.P.	36	9
Opera 74	2000	Travate appoggiate	Acciaio/Cls	44	3

Nel seguito vengono descritte le informazioni generali delle opere in questione.

3.1.1 Informazioni generali opera 1

L'opera 1, appartenente ad una strada extraurbana secondaria, presenta una lunghezza complessiva pari a 33 m ed è costituita da un'unica campata ad asse rettilineo, realizzata per poter scavalcare un piccolo torrente. Per questo ponte non è disponibile alcuna documentazione per cui la maggior parte delle informazioni sono state ricavate in sito; per lo stesso motivo l'anno di costruzione del ponte, presumibilmente il 1970, non può essere confermato con sicurezza.

Fig. 3.2 – Vista laterale opera 1

L'impalcato è costituito da sei travi in c.a.p. con sezione di altezza costante del tipo ad "I", lo spessore delle anime invece è variabile fra la testata delle travi, dove risulta maggiore, e la parte corrente, più sottile. Le travi sono disposte ad interasse costante e collegate fra loro da quattro traversi in c.a.p., due di testata e due centrali. Sulle travi insiste una soletta in c.a. gettata in opera di larghezza pari a 13,2 m. Le spalle, di cui non è nota la tipologia di fondazione, sono state realizzate in c.a. gettato in opera.

Fig. 3.3 – Dettaglio impalcato e spalla opera 1

3.1.2 Informazioni generali opera 8

Il viadotto si sviluppa lungo una strada extraurbana principale consentendo lo scavalco di un fiume. L'opera è composta da quattro campate di luce massima pari a 46 m, con un tracciato leggermente in curva e di lunghezza complessiva di 157,2 m; lo schema statico cambia fra le campate, infatti, la prima è in semplice appoggio fra spalla e pila mentre la seconda e la quarta sono caratterizzate da uno sbalzo aggettante nella terza dove, tramite sella Gerber, si appoggia una campata tampone. L'anno di costruzione è il 1978, dato confermato dai documenti disponibili.

Fig. 3.4 – Vista laterale dell'opera 8

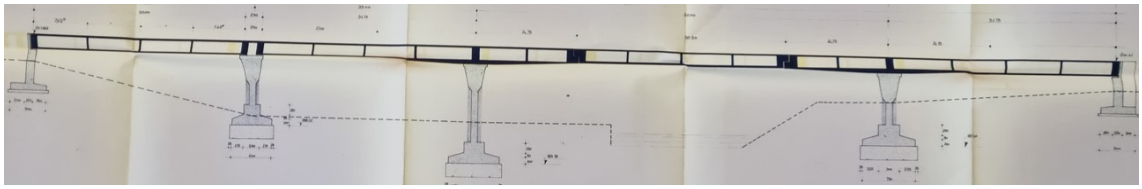


Fig. 3.5 – Tavola del prospetto laterale dell'opera 8

L'impalcato è costituito da una trave a cassone pluricellulare in c.a.p. completamente gettata in opera con cavi post tesi. Secondo la documentazione, la tesatura dei cavi è avvenuta in un'unica fase per la prima e la terza campata e in due fasi per la seconda e la quarta. L'altezza della trave a cassone è costante, pari a 2,2 m nella prima campata e in quella tampone, mentre risulta variabile da 2,2 m a 2,7 m nelle zone di appoggio della seconda e quarta campata, esigenza legata alla necessità di fronteggiare i momenti negativi. Le anime del cassone presentano spessori variabili fra le zone correnti e le zone di appoggio. La soletta sostenuta dall'impalcato è realizzata in c.a. con predalles ed ha una larghezza di 9 m comprensiva di due sbalzi di 0,5 m dal cassone ed ospita una sola carreggiata composta da due corsie in un unico senso di marcia.

Fig. 3.6 – Dettaglio dell'impalcato opera 8

Le pile sono state realizzate in c.a. gettato in opera e hanno altezze variabili; la pila 1 è alta 8,24 m, la pila 2 11,32 m e la pila 3 6,97 m. Anche le spalle sono in c.a. gettato in opera e caratterizzate da fondazioni superficiali.

Fig. 3.7 – Dettaglio della pila 2 (a sinistra) e della spalla 1 (a destra)

3.1.3 Informazioni generali opera 15

L'opera 15, a servizio di una strada extraurbana principale, è composta da tre campate di identica lunghezza pari a 33 m per uno sviluppo complessivo con asse curvilineo pari a 98,7 m. Lo schema statico per tutte le campate è quello di travi in semplice appoggio. Per questa opera non sono disponibili dei documenti originali, pertanto, l'anno di costruzione si presume sia il 1983.

Fig. 3.8 – Vista laterale opera 15

L'impalcato è costituito da quattro travi in c.a.p. a sezione trapezia di altezza costante pari a 1,35 m. Le travi, poste ad interasse costante di 4,8 m, sono collegate fra loro da traversi posti alle estremità delle stesse, in corrispondenza degli appoggi. Dall'esame visivo dell'opera sembra probabile che le travi siano di tipo a cassone e che i cavi siano post tesi ma entrambe le informazioni non sono direttamente valutabili in sito e l'assenza di documentazione non permette di avallare tale ipotesi. Le travi, in semplice appoggio in ogni campata, sostengono una soletta gettata in opera in c.a. che risulta invece essere continua su tutta la lunghezza del ponte, portando quindi alla formazione di soli due giunti, in corrispondenza delle spalle. La soletta ha larghezza complessiva pari a 18,6 m ed ospita due carreggiate ciascuna composta da due corsie.

Fig. 3.9 – Dettaglio impalcato opera 15

Le pile e le spalle sono state realizzate in c.a. gettato in opera; le prime, in particolare hanno sezione rettangolare di larghezza variabile dalla base alla testa. Entrambe le pile presentano un'altezza uguale pari a circa 6 m. Sulle sottostrutture, oltre ai baggioli che ospitano gli appoggi, sono presenti degli elementi che si innestano sui traversi fungendo da dispositivi di ritegno nei confronti degli spostamenti laterali dell'impalcato.

Fig. 3.10 – Dettaglio pila 2 (sopra) e spalla 2 (sotto)

3.1.4 Informazioni generali opera 55

Il ponte in questione, realizzato nel 1981, è a servizio di una strada extraurbana principale ed è composto da tre campate che seguono un tracciato rettilineo, consentendo lo scavalco di un fiume. L'opera, prossima ad uno svincolo, ospita una carreggiata composta da due corsie più una corsia di accelerazione. Si dispone in questo caso di documenti che chiariscono gli aspetti tecnici della struttura. Il ponte è lungo complessivamente 114 m con una luce delle campate costante pari a 34 m. Lo schema statico è quello di travi in semplice appoggio.

Fig. 3.11 – Vista laterale dell'opera 55

L'impalcato è composto da cinque travi con sezione tipo ad "I" in c.a.p. a cavi post tesi, con tracciato dei cavi parabolico. Dalle informazioni reperite emerge che la tesatura dei cavi è avvenuta in fasi diverse, infatti, la prima tesatura ha coinvolto alcuni cavi, poi sono stati realizzati i traversi e la soletta, e successivamente è stata completata la tesatura dei restanti cavi. Le anime delle travi mostrano uno spessore variabile fra le zone di appoggio e quella corrente. Le travi hanno interasse costante di 2,5 m e sono collegate fra loro da traversi in c.a.p. post teso, due traversi sono collocati, rispettivamente, alle due estremità ed altri tre sono posti in equidistanza nella parte centrale della travata. I traversi non sono collegati alla soletta. L'impalcato è completato da una soletta in c.a. gettato in opera con larghezza totale di 12,5 m, comprensiva di due cordoli di 0,4 m.

Fig. 3.12 – Dettaglio impalcato e pila 2 (a sinistra); dettaglio impalcato e spalla 2 (a destra)

Le pile sono in c.a. gettato in opera e geometricamente composte da sei pilastri distinti di diametro 1,2 m. Questi sono poi collegati in testa con un unico pulvino di altezza 1,8 m e alla base da una piattaforma di irrigidimento con altezza pari a 1 m. La fondazione delle pile è profonda e consiste, in realtà, in un prolungamento delle sezioni dei singoli pilastri all'interno del terreno per una lunghezza totale di 25 m. Anche le spalle sono state realizzate interamente in c.a. gettato in opera e presentano fondazioni profonde.

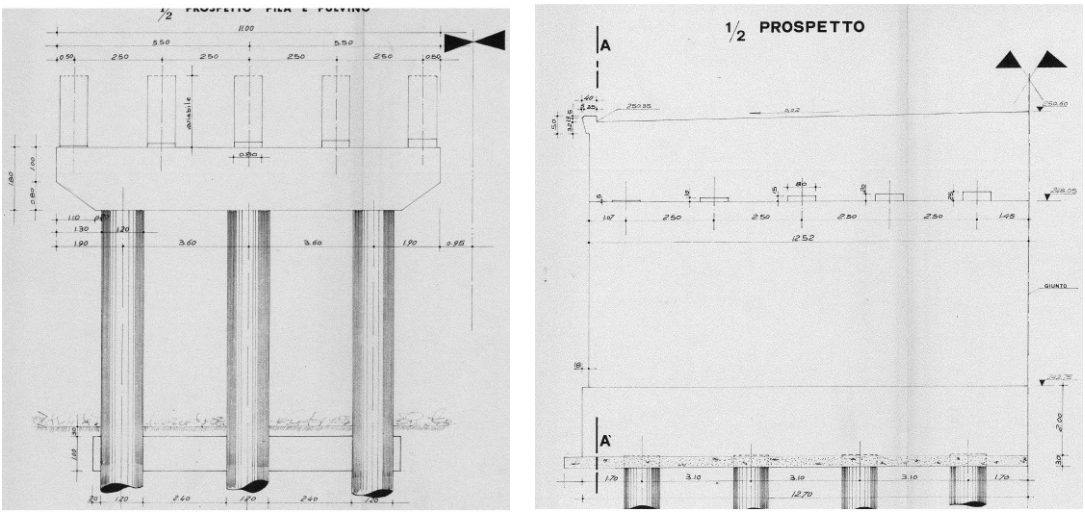


Fig. 3.13 – Tavole di prospetto della pila (a sinistra) e della spalla (a destra)

3.1.5 Informazioni generali opera 67

Il viadotto, realizzato nel 1996, appartiene ad una strada extraurbana principale e ha uno sviluppo di circa 320 m consentendo, così, di scavalcare due volte lo stesso corso d'acqua, con un tracciato in parte rettilineo e in parte in curva. Lo schema statico è quello di travi in semplice appoggio e le campate, nove in totale, hanno lunghezza pari a 34,45 m quelle di riva, e 35,4 m quelle correnti. L'impalcato ospita una sola carreggiata composta da due corsie per un'unica direzione di marcia. Per questa opera si dispone di documentazione originale di progetto.

Fig. 3.14 – Vista laterale opera 67

L'impalcato è costituito da quattro travi in c.a.p. a cavi pre tesi, hanno altezza di 2,2 m e sono poste ad interasse costante di 2,9 m. Sono collegate tramite cinque traversi in c.a.p. post teso, due con spessore maggiore alle estremità delle travi e altri tre più sottili posti a distanza costante entro la campata. Le travi sostengono una soletta gettata in opera su predalles, con una larghezza complessiva pari a 10,6 m. Sebbene le travi siano in semplice appoggio su ogni campata, la soletta è stata realizzata in continuità coprendo complessivamente tre campate, pertanto, anche i giunti di dilatazione sono intervallati allo stesso modo.

Fig. 3.15 – Dettaglio impalcato opera 67

Le pile sono gettate in opera in c.a. con fusto circolare di diametro 2,5 m ed un pulvino di forma parallelepipeda con altezza pari a 2,1 m. L'altezza delle pile è variabile e va da

0,7 m ad 1,7 m. Le fondazioni delle pile sono profonde, costruite mediante il consolidamento di colonne di terreno con la tecnica del jet-grouting. Le spalle, di tipo scatolare e realizzate in c.a. gettato in opera, presentano anche esse fondazioni profonde ma diverse fra loro. Infatti, la prima spalla ha fondazioni a pozzo con colonne di terreno consolidate tramite jet-grouting, mentre nella seconda, oltre alle colonne di terreno consolidate, sono presenti anche dei micropali.

Fig. 3.16 – Dettaglio pila (sopra) e dettaglio spalla (sotto)

3.1.6 Informazioni generali opera 74

L'opera 74 è collocata lungo una strada extraurbana secondaria dove rende possibile lo scavalco di una depressione del terreno. Il viadotto è lungo complessivamente 127 m, suddivisi in tre campate da 44 m ciascuna. Il tracciato è in rettifilo fra la spalla 1 e la pila 2 mentre diventa curvilineo dalla pila 2 alla spalla 2. Lo schema statico è a travate continue da spalla a spalla. L'impalcato ospita una sola carreggiata composta da due corsie, una per senso di marcia. L'opera è stata realizzata nel 2000.

Fig. 3.17 – Vista laterale dell'opera 74

L'impalcato è composto da due travi in acciaio corten con sezione tipo "I" e presentano altezze variabili longitudinalmente pari a 1,9 m nelle zone correnti e 2,4 m nelle zone di appoggio. Le travate sono poste a distanza costante di 6 m e sono collegate fra loro mediante dei traversi non collaboranti, anche essi in acciaio corten con sezione ad "I". - Questi ultimi hanno dimensioni maggiori nelle zone di appoggio rispetto alla parte centrale della travata. Le travi sostengono una soletta in c.a., gettata in opera su predalles, di larghezza complessiva pari a 10,7 m.

Fig. 3.18 – Dettaglio impalcato opera 74

Le pile sono in c.a. gettato in opera con sezione circolare, di diametro 3 m. Esse hanno sezione piena dalla base fino ad un'altezza di 3 m, oltre tale altezza la sezione diventa cava mantenendo lo stesso diametro esterno ed uno spessore delle pareti di 0,35 m. In testa alle pile insistono dei pulvini monolitici di forma parallelepipeda. Le fondazioni sono profonde e composte da 36 micropali di diametro 0,24 m e lunghezza 12 m. Le spalle, entrambe di dimensioni ridotte, sono state realizzate in c.a. gettato in opera e fondate anche esse su fondazioni profonde composte da micropali inclinati.

Fig. 3.19 – Dettaglio pila 2 (sopra) e spalla 2 (sotto)

3.2 Ispezioni e valutazione del livello di difettosità

In seguito alla raccolta delle informazioni sulle opere ai fini del censimento, si passa alla definizione del livello di difettosità del ponte o viadotto. Secondo quanto descritto nelle Linee Guida, per ottenere la difettosità è necessario svolgere delle ispezioni mirate a controllare lo stato di conservazione di ogni singolo elemento componente la struttura, compilando per ciascuno una *"Scheda di difettosità"* che riassume tale informazione. Le schede in questione sono allegate al testo del documento ministeriale così come si trovano in allegato le *"Schede difettologiche"*. Queste ultime sono, per l'appunto, delle schede fornite a supporto dell'attività ispettiva che contengono e spiegano tutte le possibili forme di degrado che possono essere riscontrate nei vari elementi strutturali, nonché, il peso che esse avrebbero nel caso fossero presenti. All'ispettore spetta quindi il compito di indicare quali forme di degrado siano presenti e definirne, qualora richiesto, intensità ed estensione, con lo scopo finale di raggiungere una classificazione del livello di difettosità (Tab. 3.2). Un ulteriore documento da compilare è la *"Scheda di ispezione di livello 1"* in cui devono essere riportate alcune informazioni più generali sull'opera ed alcuni semplici schemi geometrici da integrare alle informazioni sulla difettosità.

Tab. 3.2 – Classificazione del livello di difettosità (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta (*G=5 o G=4*) e di qualsiasi intensità su elementi critici (selle Gerber, appoggi, cavi di precompressione, fondazioni scalzate, si veda definizione del § 3.3) o presenza di condizioni critiche (quadri fessurativi molto estesi ed intensi, cinematismi in atto, incipiente perdita di appoggio)
MEDIO-ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta (*G=5 o G=4*) e di intensità elevata su elementi la cui crisi può compromettere la statica dell'opera, come segnalato nella scheda di rilievo all'Allegato B
MEDIO	Difetti di gravità alta o medio-alta (*G=5 o G=4*) e di intensità elevata su elementi la cui crisi non può compromettere il comportamento statico globale dell'opera e difetti di gravità alta (*G=5*) e di intensità medio-bassa
MEDIO-BASSO	Difetti di gravità medio-alta (*G=4*) con intensità medio-bassa e difetti di gravità media e bassa (*G=3, G=2, G=1*) e di qualsiasi intensità, in numero elevato
BASSO	Difetti di gravità media e bassa (*G=3, G=2, G=1*) e di qualsiasi intensità, in numero esiguo

Per i ponti esaminati in questo lavoro, i sopralluoghi previsti al livello 0 avevano già messo in luce le modalità di svolgimento delle ispezioni e, nei casi in cui era necessario, l'utilizzo di mezzi di supporto all'attività ispettiva. Durante questa fase sono stati

utilizzati strumenti molto semplici come il disto laser per una misura indicativa delle distanze maggiori, il metro per lunghezze minori e una fotocamera digitale per garantire un'adeguata documentazione fotografica delle opere. Dato che le *"Schede di difettosità"* sono nominative per ogni elemento strutturale, prima delle ispezioni, per ogni ponte sono stati realizzati alcuni elaborati grafici in cui sono riportati sinteticamente gli schemi strutturali con tutti gli elementi numerati, seguendo le regole della numerazione dell'ente gestore. Nel seguito vengono riassunte, per le opere in esame, le osservazioni derivanti dalle analisi dei difetti, specificando infine il relativo livello di difettosità.

3.2.1 Analisi della difettosità dell'opera 1

Entrambe le spalle mostrano macchie di umidità, sia attiva che passiva, con ammaloramenti del cls e con la formazione di una patina biologica sulla superficie delle zone più umide. Sulla spalla 2, nelle zone di attacco con in muri d'ala, sono presenti dei vespai e dei punti di distacco del copriferro in cui è possibile notare la presenza di armatura ossidata.

Fig. 3.20 – Dettaglio dello stato di conservazione della spalla 2 (a sinistra) e del vespaio nella zona d'angolo (a destra)

Sulle travi sono presenti delle zone di distacco del copriferro con relative armature ossidate, localizzate principalmente in prossimità degli elementi di scolo delle acque che sono però mancanti. Per il resto, eccetto diffuse zone di accumulo dell'umidità, le travi

sembrano essere in buono stato. Il tampone della trave 6, l'unica ispezionabile in testata, risulta distaccato.

Fig. 3.21 – Dettaglio del distacco del copriferro e ossidazione delle barre di armatura su trave 1 (a sinistra) e del distacco del tampone di testata su trave 6 (a destra)

I traversi presentano macchie di umidità sia passiva che attiva diffuse, globalmente, su tutti gli elementi. Il traverso 4 mostra una zona contenuta in cui è avvenuto il distacco del copriferro con successiva ossidazione dell'armatura. Anche la soletta è interessata dalla presenza di umidità passiva ed attiva diffusa sia al centro che sugli sbalzi, con zone localizzate di distacco del copriferro ed ossidazione delle barre di armatura, in particolare in prossimità delle zone di scolo delle acque meteoriche.

Fig. 2.22 – Dettaglio degrado del traverso 4 (a sinistra) e della soletta (a destra)

I giunti sulla pavimentazione stradale sono stati sostituiti di recente, pertanto, si mostrano in buono stato. Si evidenzia la presenza di fogliame che ostruisce le vie di scolo delle acque. Complessivamente, quindi, si può dire che l'opera non desta particolari preoccupazioni dal punto di vista della conservazione ma il suo stato non può essere definito buono a causa della diffusa presenza di umidità legata, sia alla cattiva regimentazione delle acque meteoriche, sia alla presenza del torrente al di sotto. Elaborando le informazioni ottenute dall'ispezione, all'opera 1 è stato attribuito un livello di difettosità Medio-Basso.

3.2.2 Analisi della difettosità dell'opera 8

Le spalle e la pila 1 mostrano zone di umidità attiva e passiva con locale ammaloramento del cls ed espulsioni del copriferro accompagnate da ossidazione delle armature. Questi difetti sono stati promossi dalla presenza di sistemi di convogliamento delle acque non idonei. Infatti, sulle pile 2 e 3 i giunti sono assenti a causa della continuità delle travate e lo stato di conservazione delle due pile risulta essere buono. Sulla spalla 1 sono presenti anche piccole fessure orizzontali che si sviluppano per tutta la lunghezza dell'elemento.

Fig. 3.23 – Dettaglio ammaloramento pulvino pila 1

Fig. 3.24 – Dettaglio fessure orizzontali spalla 1 (a sinistra) e macchie di umidità spalla 1 (a destra)

Le travi si mantengono sostanzialmente in buono stato con la presenza di piccoli distacchi del copriferro localizzati sul fondo del cassone in prossimità delle zone di scolo. In alcuni punti si riscontrano piccoli vespai e zone di umidità attiva. La testata delle travi, visibile dalla pila 1, non presenta forme di degrado rilevanti, così come l'interno dei cassoni, per quanto visibile sempre dalla pila 1. Gli sbalzi del cassone Gerber presentano delle zone di rattoppo dovute al danneggiamento da urto avvenuto a causa di una piena durante la fase di costruzione dell'opera. Le selle Gerber mostrano invece un ammaloramento abbastanza marcato, causato dall'ingresso di acque meteoriche. Le parti visibili delle solette mostrano, come negli altri elementi, ammaloramenti localizzati nelle zone in cui sono presenti dei giunti. Anche gli appoggi, di tipo "vasoflon", mostrano maggiori

condizioni di degrado proprio sulle spalle e sulla pila 1, ossia nei punti in cui insistono elementi di giunzione strutturale.

Fig. 3.25 – Dettaglio dell'interno cassone 1 (a sinistra) e del danno da urto su cassone 2 (a destra)

Fig. 3.26 – Particolare ammaloramento sella Gerber 1 e soletta 2 (a sinistra) e lesione verticale su appoggio 20 (a destra)

In generale, è possibile dire che gli elementi strutturali lontani dai giunti sono in buono stato di conservazione mentre gli altri elementi risultano più ammalorati. In definitiva, l'opera non si trova in uno stato particolarmente gravoso ma la presenza di degrado significativo sulle selle Gerber, considerate elementi critici, porta comunque l'opera ad un livello di difettosità Alto.

3.2.3 Analisi della difettosità dell'opera 15

Le pile non presentano alcuna forma di degrado e si trovano in un buono stato di conservazione, circostanza legata al fatto che non esistono giunti intermedi sul ponte poiché la soletta è continua. Infatti, le spalle, che si trovano in corrispondenza dei giunti di estremità, mostrano un diffuso stato di ammaloramento con macchie di umidità passiva ed attiva e zone di distacco del copriferro e ossidazione delle armature.

Fig. 3.27 – Dettaglio macchie di umidità e ammaloramento cls su spalla 1

Sia travi che traversi mostrano un diffuso stato di fessurazione ma di lieve entità; alcune travi e traversi presentano, localmente, zone in cui è avvenuto il distacco del copriferro e la successiva ossidazione delle armature. Le solette si trovano, globalmente, in un buono di conservazione eccetto nelle zone di scolo dei pluviali dove evidentemente, a causa della cattiva regimentazione delle acque, è avvenuto il distacco del copriferro e la corrosione delle barre di armatura. Per quanto riguarda gli appoggi, la maggior parte di essi non sono stati ispezionati perché ricoperti da un involucro di protezione in polistirolo. Gli unici che sono stati analizzati non mostrano particolari forme di degrado ma soltanto alcuni segni di deformazione della piastra di base e un leggero invecchiamento del neoprene. Si evidenzia, inoltre, la presenza di detriti sulle spalle, che potrebbero quindi ostacolare i movimenti degli appoggi. Va sottolineato che l'opera è realizzata con travi a

cassoncino in c.a.p. post teso e necessita quindi di un'ispezione speciale, dato che non è stato possibile approfondire l'ispezione fino ai cavi da precompressione.

Fig. 3.28 – Dettaglio fessure su trave 1 (a sinistra), ammaloramento della soletta in corrispondenza dei pluviali (sopra a destra) e presenza di detriti in prossimità degli appoggi (sotto a destra)

Complessivamente, dalle analisi effettuate, si può concludere che l'opera 15 si trova in uno stato di conservazione buono e che, seguendo le indicazioni delle Linee Guida, il livello di difettosità risulta essere Medio-Basso.

3.2.4 Analisi delle difettosità dell'opera 55

Le pile si trovano in uno stato di conservazione non particolarmente gravoso con espulsioni del copriferro ed ossidazione delle armature diffusa ma principalmente localizzata sui pulvini sulla parte rivolta verso fiume. Le spalle invece, a causa dell'inefficienza dei giunti, mostrano un ammaloramento più marcato con macchie di umidità attive e passive, espulsione del copriferro e corrosione delle armature. Nella spalla 2 si notano anche delle lesioni da schiacciamento sui baggioli di appoggio delle travi.

Fig. 3.29 – Particolare degrado del pulvino su pila 2 (in alto a sinistra), degrado su spalla 2 (in alto a destra) e lesioni da schiacciamento su un baggiolo di spalla 2 (in basso)

Travi e traversi non presentano segni di degrado mantenendosi in buono stato di conservazione. La soletta, allo stesso modo, nella parte centrale non risulta degradata, ma presenta delle zone di ammaloramento del cls ed ossidazione delle barre di armatura in prossimità dei pluviali e delle zone di bordo degli sbalzi, a causa della cattiva regimentazione delle acque.

Fig. 3.30 – Dettagli dell'ammaloramento della soletta sui bordi

In definitiva lo stato di conservazione complessivo dell'opera può ritenersi discreto. Tuttavia, le lesioni da schiacciamento sui baggioli della spalla 2 sono identificate come difetti con peso grave ma non trovandosi nella condizione di poter compromettere la statica globale dell'opera il livello di difettosità viene fissato come Medio.

3.2.5 Analisi delle difettosità dell'opera 67

In questa opera le pile sono parzialmente interrate quindi l'analisi dei difetti è mirata principalmente ai pulvini. Questi, presentano forme di degrado legate alle infiltrazioni di acque meteoriche, quindi, dilavamento del cls, espulsione del copriferro e ossidazione delle armature scoperte. Sulla piccola porzione di fusto visibile della pila 4 vi è la presenza di un danno da urto non grave. Sul pulvino della pila 6 sono presenti ristagni di acqua. La spalla 1 presenta solamente macchie di umidità attiva e passiva, mentre la spalla 2 oltre alle macchie di umidità, ma con intensità ed estensione maggiori, mostra anche ammaloramento del cls e corrosione delle armature. Inoltre, un baggiolo della spalla 2 risulta essere lesionato.

Fig. 3.31 – Particolare lesione da urto pila 4 (in alto a sinistra), degrado sui pulvini (in alto a sinistra) e degrado della spalla 2 (in basso)

Su tutte le travi sono presenti fenomeni di accumulo dell'umidità sia attivi che passivi, ma in particolare questi risultano più estesi ed intensi sulle travi esterne. Su queste ultime, inoltre, è possibile individuare delle tracce di scolo e, in alcuni punti, la rottura del copriferro con successiva ossidazione delle armature. I traversi si trovano in uno stato analogo a quello delle travi, in particolar modo il degrado è concentrato nelle zone di testata con dilavamento del calcestruzzo del copriferro e corrosione delle armature. Le stesse considerazioni possono essere estese anche alle solette che presentano macchie di umidità diffuse e punti di maggiore ammaloramento con distacco del copriferro e ossidazione delle armature.

Fig. 3.32 – Dettaglio dei difetti presenti sulla soletta (in alto), distacco del copriferro localizzato sulla trave (in basso a sinistra) e ammaloramento della testata del traverso (in basso a destra)

Riassumendo le informazioni dei difetti presenti su questo ponte si può dire che questi non sono particolarmente gravi, ma essendo estesi su quasi tutti gli elementi strutturali è stato attribuito all'opera un livello di difettosità Medio.

3.2.6 Analisi della difettosità dell'opera 74

Data la continuità della soletta e la conseguente assenza di giunti strutturali intermedi, le pile non mostrano alcun segno di degrado. Le infiltrazioni di acque meteoriche dai giunti di estremità hanno compromesso la conservazione delle spalle dove, infatti, sono presenti zone di ristagno e macchie di umidità diffuse sia attive che passive e, localmente, distacchi dei copriferri e ossidazione delle armature.

Fig. 3.33 – Particolari del degrado presente su spalla 1 (a sinistra) e spalla 2 (a destra)

Sia travi che traversi si trovano in un buono stato di conservazione grazie allo strato passivante che si è formato uniformemente su tutti gli elementi. Solamente la trave 1 presenta, in prossimità della zona di appoggio sulla spalla 1, fenomeni di corrosione che hanno prodotto un'esfoliazione della stessa con spessori di circa 1-2 mm. I collegamenti bullonati non presentano fenomeni di degrado. A causa del carente convogliamento delle acque, la soletta mostra nei tratti prossimi ai pluviali, tracce di scolo, distacco del copriferro e ossidazione delle armature. Gli appoggi, eccetto il 5 ed il 6, sono ossidati e negli appoggi 7 e 8, sulla spalla 2, vi è la presenza di detriti che potrebbero ridurre la capacità di movimento dei dispositivi.

Fig. 3.34 – Dettaglio dell'esfoliazione della trave 1 in prossimità dell'appoggio con la spalla 1 (a sinistra) e ammaloramento della soletta in corrispondenza del pluviale (a destra)

Alla luce delle informazioni ottenute dall'analisi dei difetti è possibile concludere che l'opera 74 versa in un buono stato di conservazione. Sebbene sia presente un unico difetto di classe Medio-Alta associato alla corrosione della trave 1, ma comunque di lieve entità e molto limitato, si è scelto di associare al ponte un livello di difettosità Basso.

3.3 Definizione della classe di attenzione

Le informazioni che sono state ricavate dal censimento delle opere nel livello 0 e successivamente dalle ispezioni di livello 1, combinate seguendo le indicazioni riportate nelle Linee Guida, conducono alla definizione delle classi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione e, quindi, alla classe di attenzione. Nel lavoro svolto, essendo non note le informazioni relative alla parte idrogeologica, la definizione della CdA sarà rivolta alla parte strutturale e a quella sismica. Si specifica, inoltre, che tutte le informazioni sulle opere che verranno riportate nel seguito sono le stesse già ricavate al capitolo precedente, compresi i dati che sono stati dedotti da ipotesi effettuate che, pertanto, rimarranno invariate. È opportuno sottolineare che, nelle prossime pagine, ad ogni opera viene attribuito uno specifico colore al fine di definire graficamente i percorsi seguiti dalle stesse all'interno degli schemi logici proposti dalle Linee Guida.

3.3.1 Definizione della pericolosità strutturale e fondazionale

La pericolosità rappresenta le possibilità di raggiungere le condizioni di collasso associate ad una generica opera. Questa è legata alla massa dei veicoli che transitano sul ponte e alla frequenza di passaggio. Nella seguente tabella sono riportate tali informazioni per le opere analizzate.

Tab. 3.2 – Informazioni sulla pericolosità strutturale e fondazionale

N°opera	Classe di massa ammissibile		Traffico giornaliero medio mezzi pesanti	
	Limitazioni di massa [t]	Classe	Frequenza [veic./gg]	Classe
Opera 1	7,5	D	TGMp ≤ 300	Bassa
Opera 8	-	A	TGMp ≤ 300	Bassa
Opera 15	-	A	TGMp ≤ 300	Bassa
Opera 55	-	A	300 < TGMp < 700	Media
Opera 67	-	A	300 < TGMp < 700	Media
Opera 74	-	A	300 < TGMp < 700	Media

I dati illustrati sono stati combinati fra loro secondo la seguente tabella, da cui si è potuto ottenere il livello di pericolosità.

Tab. 3.3 – Classi di pericolosità in funzione della classe stradale e della frequenza del passaggio di veicoli commerciali (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020) con indicazione dei risultati delle opere esaminate

	Frequenza passaggi di veicoli commerciali		
Classe A Carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche	**Alta**	**Media**	**Bassa**
	ALTA	● ● ● ALTA	● ● MEDIO-ALTA
Classe B Limitazione di carico a 44 t	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	ALTA	MEDIO-ALTA	MEDIA
Classe C Limitazione di carico a 26 t	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	MEDIO-ALTA	MEDIA	MEDIO-BASSA
Classe D Limitazione di carico a 8,0 t	**Frequenza passaggi di veicoli commerciali**		
	Alta	**Media**	**Bassa**
	MEDIA	MEDIO-BASSA	● BASSA
Classe E Limitazione di carico a 3,5 t	BASSA		

Quindi, riassumendo i risultati, per le opere analizzate vengono identificate le seguenti classi di pericolosità.

Tab. 3.4 – Classi di pericolosità strutturale e fondazionale

N°opera	Pericolosità strutturale e fondazionale
Opera 1	Bassa
Opera 8	Medio-Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Alta
Opera 67	Alta
Opera 74	Alta

3.3.2 Definizione della vulnerabilità strutturale e fondazionale

La vulnerabilità strutturale rappresenta i possibili danni che possono verificarsi in una data opera. Essa, secondo le Linee Guida, è legata al livello di difettosità attuale, all'età del ponte, intesa come periodo di tempo in cui tali difettosità possono essersi sviluppate, alle norme di progettazione del ponte ed infine alle sue caratteristiche strutturali, ossia schema statico, materiale, luce massima delle campate e numero di campate. Per ogni opera analizzata si riportano le informazioni alla base della definizione della classe di vulnerabilità.

Tab. 3.5 – Tabella riassuntiva delle informazioni per la definizione dei parametri

N°opera	Anno di costruzione	Categoria ponte	Norma di riferimento	Schema strutturale	Materiale	Luce max. [m]	N°campate
Opera 1	1970	-	1962	Travi appoggiate	C.A.P.	33	1
Opera 8	1978	I	1962	Travi Gerber	C.A.P.	46	4
Opera 15	1983	I	1962	Travi appoggiate	C.A.P.	33	3
Opera 55	1981	I	1962	Travi appoggiate	C.A.P.	38	3
Opera 67	1981	I	1962	Travi appoggiate	C.A.P.	36	9
Opera 74	2000	-	1990	Travi continue	Misto	44	3

Va ricordato che, schema strutturale, materiale, luce massima delle campate e numero delle campate vanno combinate insieme in un unico parametro in conformità con quanto già descritto nel capitolo 2[6]. A questo punto è possibile individuare i parametri che tracciano il percorso da seguire nel flusso logico per la definizione del livello di vulnerabilità.

[6] Capitolo 2, par. 2.2.2, Tab 2.2, p. 42

Tab. 3.6 – Parametri che definiscono il percorso nel flusso logico della classe di vulnerabilità strutturale e fondazionale

N°opera	Livello di difettosità attuale	Rapidità di evoluzione del degrado	Norma di progettazione	Schema statico, materiale, luce max., numero di campate
Opera 1	Medio-Basso	1945 - 1980	A	Medio-Alta
Opera 8	Alto	1945 - 1980	B	Alta
Opera 15	Medio-Basso	≥ 1980	B	Medio-Alta
Opera 55	Medio	≥ 1980	B	Medio-Alta
Opera 67	Medio	≥ 1980	B	Alta
Opera 74	Basso	≥ 1980	B	Medio-Alta

I parametri vengono inseriti nel flusso logico descritto dalle Linee Guida come mostrato nel seguente figura.

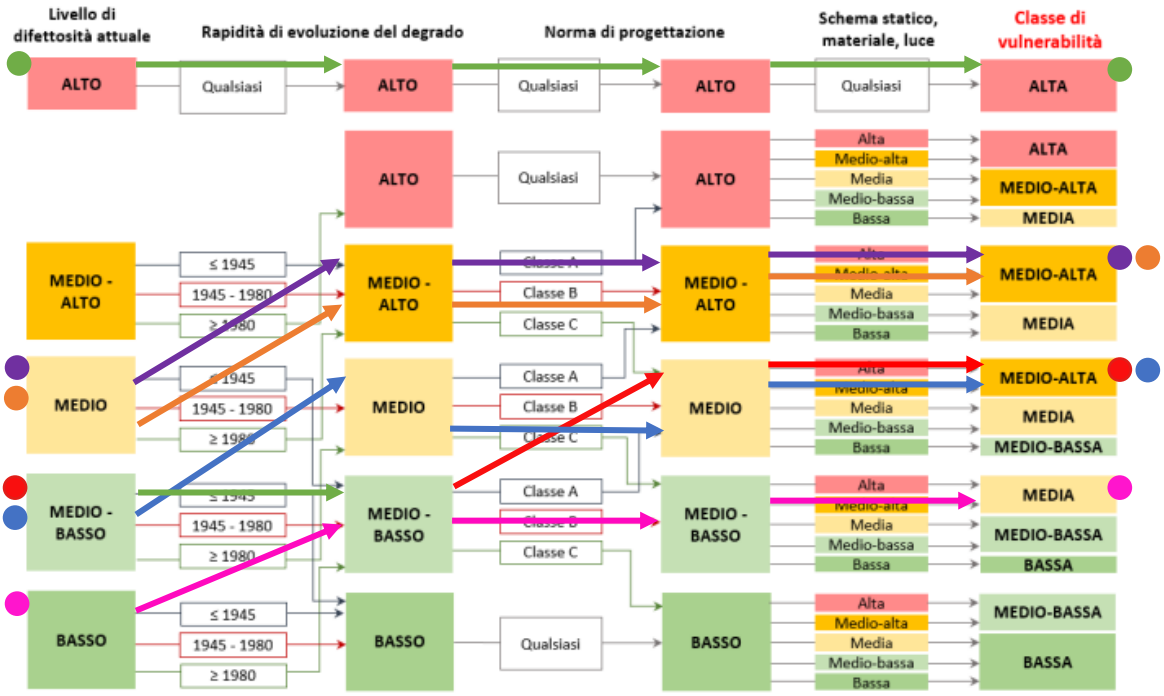


Fig. 3.35 – Tracciamento dei flussi logici della vulnerabilità strutturale e fondazionale delle opere secondo le indicazioni delle Linee Guida (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Quindi, riassumendo le informazioni riportate nel grafico, le classi di vulnerabilità ricavate sono le seguenti.

Tab. 3.7 – Classi di vulnerabilità strutturale e fondazionale

N°opera	Vulnerabilità strutturale e fondazionale
Opera 1	Medio-Alta
Opera 8	Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta
Opera 74	Media

3.3.3 Definizione dell'esposizione strutturale e fondazionale

L'esposizione rappresenta l'entità degli effetti che si avrebbero nel caso in cui una generica opera raggiunga le condizioni di collasso. I parametri che la definiscono sono il traffico medio giornaliero, la luce media delle campate, la presenza di alternative stradali e la tipologia di ente che l'opera scavalca.

Si riportano le informazioni che devono essere utilizzate per definire i parametri con i quali si procede successivamente al tracciamento del flusso logico.

Tab. 3.8 – Informazioni per la definizione dei parametri legati all'esposizione strutturale e fondazionale

N°opera	Traffico medio giornaliero [veic./gg]	Luce media [m]	Ente scavalcato
Opera 1	10000 < TGM < 25000	20 m < L ≤ 50 m	Fiume
Opera 8	TGM ≤ 10000	20 m < L ≤ 50 m	Fiume
Opera 15	TGM ≤ 10000	20 m < L ≤ 50 m	Fiume
Opera 55	TGM ≤ 10000	20 m < L ≤ 50 m	Fiume
Opera 67	TGM ≤ 10000	20 m < L ≤ 50 m	Fiume
Opera 74	TGM ≤ 10000	20 m < L ≤ 50 m	Discontinuità del terreno

I dati relativi al traffico medio giornaliero e alla luce media delle campate devono essere combinati seguendo la tabella proposta dalle Linee Guida già descritta al capitolo 2[7]. Allo stesso capitolo è riportata anche la descrizione che si deve seguire per classificare l'ente scavalcato[8]. I parametri già combinati fra loro sono riassunti in seguito.

[7] Capitolo 2, par. 2.2.3, Tab. 2.3, p. 48
[8] Capitolo 2, par 2.2.3, pp. 50-51

Tab. 3.9 – Parametri che definiscono i percorsi nel flusso logico della classe di esposizione strutturale e fondazionale

N°opera	TGM e Luce media	Alternative stradali	Tipologia di ente scavalcato
Opera 1	Media	Presenti	Media
Opera 8	Medio-Bassa	Assenti	Media
Opera 15	Medio-Bassa	Assenti	Media
Opera 55	Medio-Bassa	Assenti	Media
Opera 67	Medio-Bassa	Assenti	Media
Opera 74	Medio-Bassa	Presenti	Bassa

Con questi parametri possono essere tracciati i percorsi logici che individuano la classe di esposizione così come mostrato nella figura che segue.

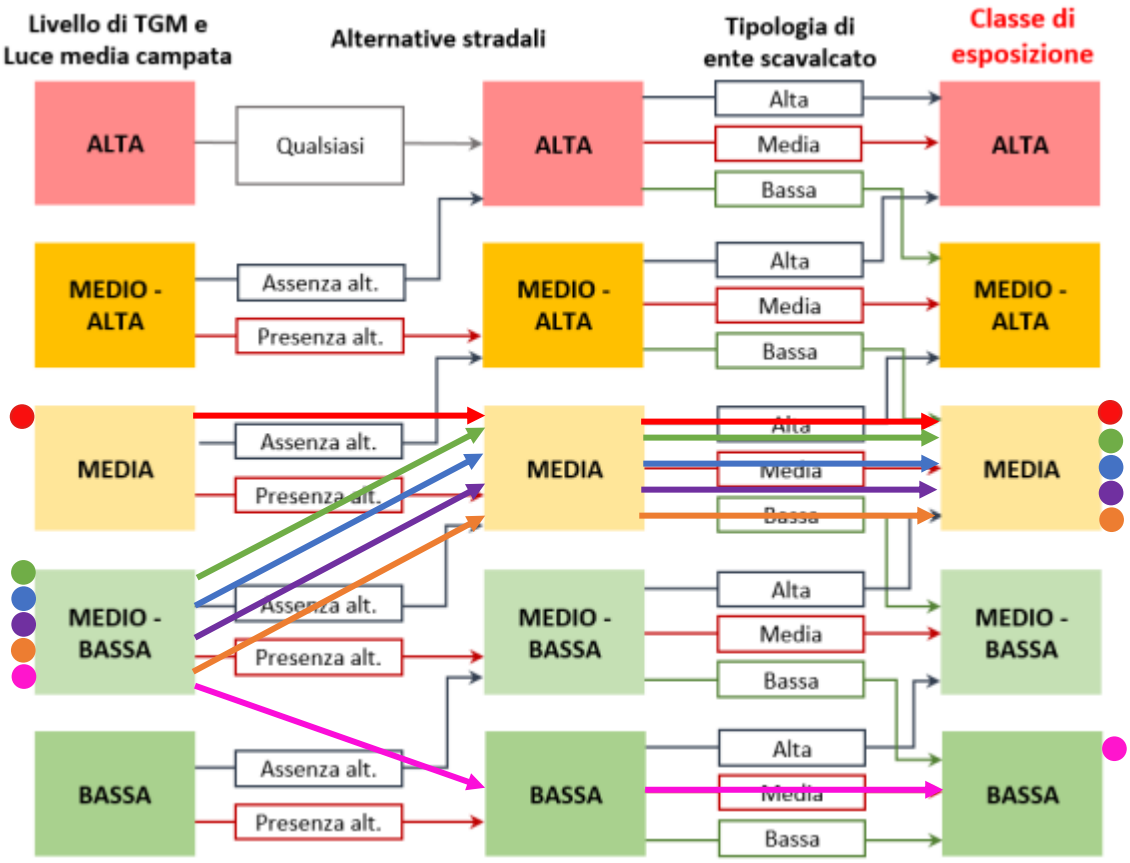


Fig. 3.35 – Tracciamento dei flussi logici dell'esposizione secondo quanto descritto dalle Linee Guida (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Pertanto, le classi di esposizione sono le seguenti.

Tab. 3.10 – Classi di esposizione

N°opera	Esposizione strutturale e fondazionale
Opera 1	Media
Opera 8	Media
Opera 15	Media
Opera 55	Media
Opera 67	Media
Opera 74	Bassa

3.3.4 Definizione della classe di attenzione strutturale e fondazionale

I livelli di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, combinati fra loro secondo le indicazioni riportate nel documento ministeriale, vanno a comporre la classe di attenzione strutturale. A tal fine vengono riepilogati i livelli ottenuti per tutte le opere.

Tab. 3.11 – Riassunto dei livelli di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione

N°opera	Pericolosità strutturale e fondazionale	Vulnerabilità strutturale e fondazionale	Esposizione strutturale e fondazionale
Opera 1	Bassa	Medio-Alta	Media
Opera 8	Medio-Alta	Alta	Media
Opera 15	Medio-Alta	Medio-Alta	Media
Opera 55	Alta	Medio-Alta	Media
Opera 67	Alta	Medio-Alta	Media
Opera 74	Alta	Media	Bassa

Si riportano quindi le tabelle utilizzate per la definizione della CdA con le indicazioni dei percorsi seguiti dalle opere.

Tab. 3.12 – Tabelle per la definizione della CdA strutturale e fondazionale relative alla pericolosità Alta, Medio-Alta e Bassa (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Classe di pericolosità ***ALTA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta		Medio-Alta		
	Media	Alta	Medio-Alta		Media	
	Medio-Bassa	Medio-Alta	Media			
	Bassa	Medio-Alta	Media		Medio-Bassa	

Classe di pericolosità ***MEDIO-ALTA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta	Medio-Alta			Media
	Media	Medio-Alta		Media		
	Medio-Bassa	Media			Medio-Bassa	
	Bassa	Media		Medio-Bassa		Bassa

Classe di pericolosità ***BASSA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Medio-Alta	Media			Medio-Bassa
	Media	Media			Medio-Bassa	Bassa
	Medio-Bassa	Media		Medio-Bassa	Bassa	
	Bassa	Medio-Bassa		Bassa		

Pertanto, i valori delle classi di attenzione ottenuti per le opere in esame sono i seguenti.

Tab. 3.13 – Classi di attenzione strutturale e fondazionale

N°opera	Classe di attenzione strutturale e fondazionale
Opera 1	Media
Opera 8	Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta
Opera 74	Media

3.3.5 Definizione della pericolosità sismica

Il significato della pericolosità rimane invariato rispetto a quello strutturale e fondazionale ma in questo caso il possibile collasso di un'opera è conseguente ad un dato evento sismico. Le informazioni che definiscono la pericolosità sono l'accelerazione di picco al suolo, la categoria topografica e la categoria di sottosuolo. Questi dati vengono riportati nel seguito per ogni opera, con i valori di accelerazione e categoria topografica già combinati secondo la tabella descritta al precedente capitolo[9].

Tab. 3.14 – Parametri necessari alla definizione della classe di pericolosità sismica

N°opera	Accelerazione di picco e categoria topografica			Categoria di sottosuolo
	a_g [m/s^2]	Categoria topografica	Classe	
Opera 1	0,183 g	T1	Medio-Alta	C-D-E
Opera 8	0,174 g	T1	Medio-Alta	A-B
Opera 15	0,175 g	T1	Medio-Alta	A-B
Opera 55	0,177 g	T1	Medio-Alta	A-B
Opera 67	0,192 g	T1	Medio-Alta	A-B
Opera 74	0,187 g	T2	Medio-Alta	A-B

I parametri appena descritti vengono utilizzati per trovare la classe di pericolosità sulla base dello schema logico definito dalle Linee Guida.

[9] Capitolo 2, par. 2.2.5, Tab. 2.5, p. 57

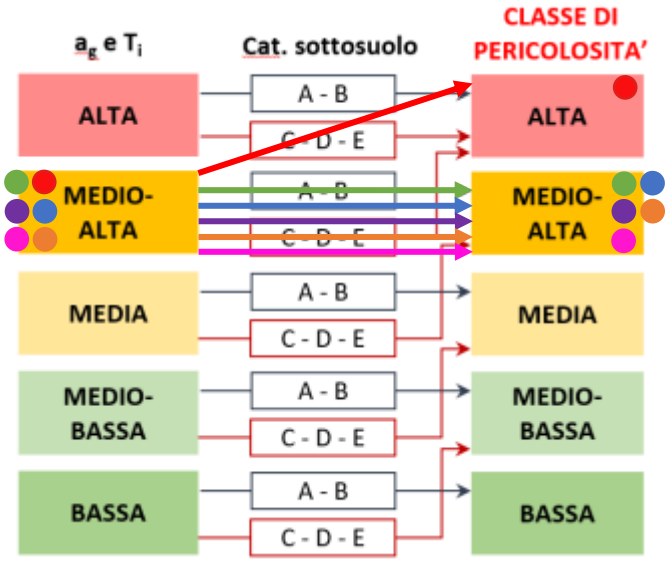


Fig. 3.36 – Tracciamento dei flussi logici per la definizione della pericolosità sismica secondo le indicazioni fornite dalle Linee Guida (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Ricapitolando, le classi di pericolosità trovate sono le seguenti.

Tab. 3.15 – Classi di pericolosità sismica

N°opera	Pericolosità sismica
Opera 1	Alta
Opera 8	Medio-Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta
Opera 74	Medio-Alta

3.3.6 Definizione della vulnerabilità sismica

Anche il concetto di vulnerabilità resta analogo ma si pone particolare attenzione alle interazioni che si creano fra struttura e sisma. Infatti, le Linee Guida invitano, in fase di ispezione delle opere, ad indagare anche sulle possibili criticità che esse possono manifestare nel caso di evento sismico e di integrare tale dettaglio con il livello di difettosità. Delle opere esaminate, nessuna presenta elementi critici nei confronti del sisma, quindi, la difettosità presa in considerazione è esattamente la stessa utilizzata anche per la definizione della vulnerabilità strutturale e fondazionale. I parametri che conducono

alla vulnerabilità sismica sono: schema statico, luce massima delle campate, materiale, criteri di progettazione utilizzati e livello di difettosità.

Tab. 3.16 – Informazioni sulle caratteristiche strutturali delle opere

N°opera	Schema statico	Materiale	Luce max.	Elementi critici nei confronti del sisma
Opera 1	Isostatico	C.A.P.	33	No
Opera 8	Isostatico	C.A.P.	46	Si
Opera 15	Isostatico	C.A.P.	33	Si
Opera 55	Isostatico	C.A.P.	38	No
Opera 67	Isostatico	C.A.P.	36	Si
Opera 74	Iperstatico	Misto	44	Si

Come accade per la vulnerabilità strutturale, schema statico, luce massima e materiale devono essere combinati insieme prima di essere inseriti nel flusso logico, rispettando le indicazioni proposte dalle Linee Guida e descritte al precedente capitolo[10]. Si riportano, quindi, tutti i parametri che devono essere utilizzati per trovare la vulnerabilità.

Tab. 3.17 – Parametri da inserire nel flusso logico per la definizione della vulnerabilità sismica

N°opera	Schema statico, materiale e luce	Criteri di progettazione	Livello di difettosità
Opera 1	Medio-Alta	No	Medio-Basso
Opera 8	Alta	No	Alto
Opera 15	Alta	Si	Medio-Basso
Opera 55	Alta	No	Medio
Opera 67	Alta	Si	Medio
Opera 74	Media	Si	Basso

Con questi parametri si può tracciare il percorso che conduce alla classe di vulnerabilità come mostrato nella successiva figura.

[10] Capitolo 2, par. 2.2.6, Tab. 2.6, pp. 60-61

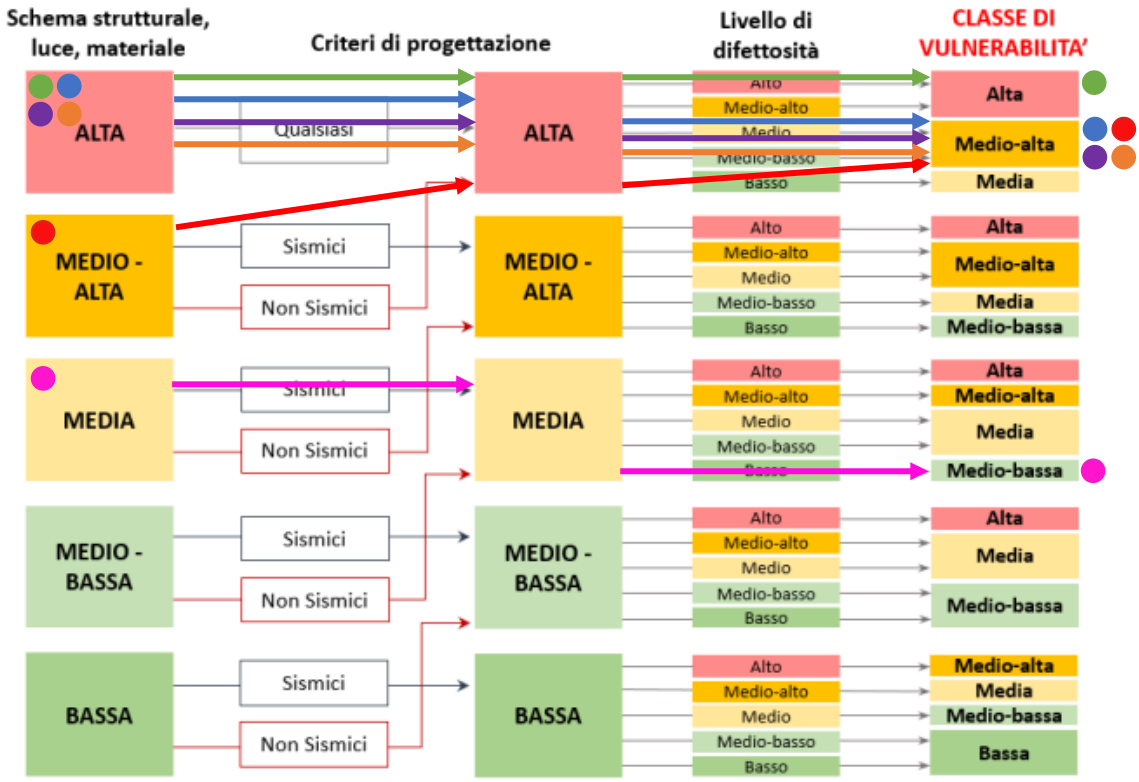


Fig. 3.37 – Tracciamento dei flussi logici per la definizione della vulnerabilità sismica secondo le indicazioni fornite dalle Linee Guida (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Le classi di vulnerabilità sismica ottenute sono riassunte nella seguente tabella.

Tab. 3.18 – Classi di vulnerabilità sismica

N°opera	Vulnerabilità sismica
Opera 1	Medio-Alta
Opera 8	Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta
Opera 74	Medio-Bassa

3.3.7 Definizione dell'esposizione sismica

Per quanto riguarda la classe di esposizione la corrispondenza con quella strutturale non è presente solo a livello concettuale ma anche a livello di definizione. Infatti, l'esposizione sismica viene determinata a partire da quella strutturale a cui però si

aggiunge un ulteriore parametro, ossia la strategicità dell'opera. Di seguito si riportano le classi di esposizione già ricavate precedentemente nella parte strutturale insieme alle condizioni di strategicità delle opere.

Tab. 3.19 – Parametri da inserire nel flusso logico per la definizione dell'esposizione sismica

N°opera	Esposizione strutturale e fondazionale	Strategicità dell'opera
Opera 1	Media	No
Opera 8	Media	Si
Opera 15	Media	Si
Opera 55	Media	Si
Opera 67	Media	Si
Opera 74	Bassa	No

Con i parametri appena descritti è possibile seguire un percorso logico all'interno del diagramma di flusso per la definizione della classe di esposizione sismica.

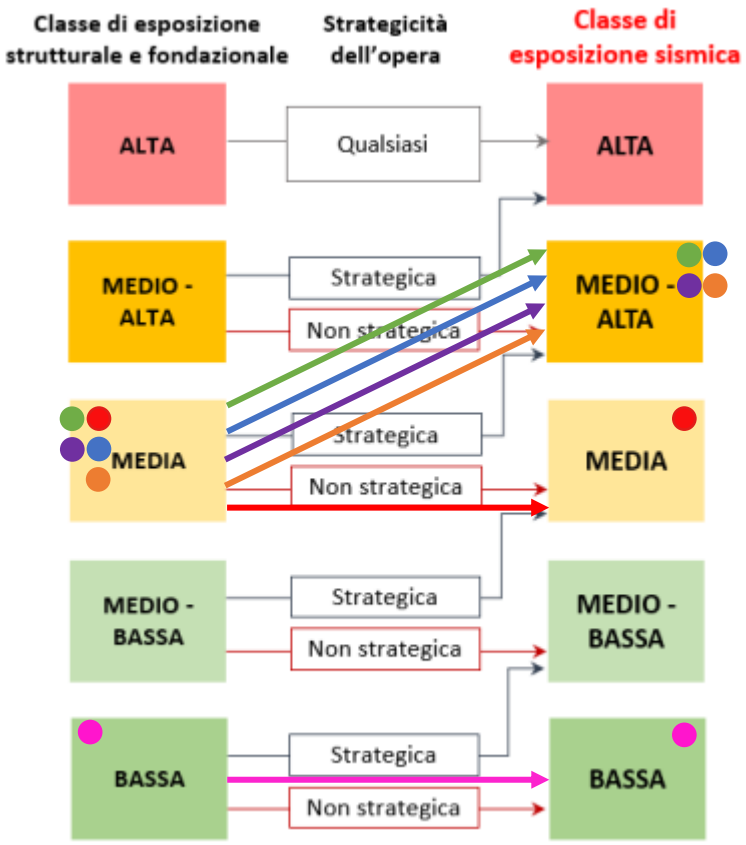


Fig. 3.38 – Tracciamento dei flussi logici per la definizione dell'esposizione sismica secondo le indicazioni fornite dalle Linee Guida (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Nella tabella seguente si riassume quanto appena trovato nel flusso logico.

Tab. 3.20 – Classi di esposizione sismica

N°opera	Esposizione sismica
Opera 1	Media
Opera 8	Medio-Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta
Opera 74	Bassa

3.3.8 Definizione della classe di attenzione sismica

Trovati i valori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione per ogni opera, relativamente alla parte sismica, è possibile raggiungere la classe di attenzione sismica. A tale scopo si riportano riassuntivamente le informazioni ricavate per i tre suddetti parametri.

Tab. 3.21 – Riepilogo dei livelli di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione sismica

N°opera	Pericolosità sismica	Vulnerabilità sismica	Esposizione sismica
Opera 1	Alta	Medio-Alta	Media
Opera 8	Medio-Alta	Alta	Medio-Alta
Opera 15	Medio-Alta	Medio-Alta	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta	Medio-Alta	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta	Medio-Alta	Medio-Alta
Opera 74	Medio-Alta	Medio-Bassa	Bassa

Le tabelle da utilizzare per la definizione della CdA sismica sono le stesse che si utilizzano per la parte strutturale e fondazionale. In seguito, si riportano le tabelle su cui vengono indicate le informazioni appena mostrate.

Tab. 3.22 – Tabelle per la definizione della CdA sismica relative alla pericolosità Alta e Medio-Alta (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2020)

Classe di pericolosità ***ALTA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta		Medio-Alta		
	Media	Alta	Medio-Alta		Media	
	Medio-Bassa	Medio-Alta	Media			
	Bassa	Medio-Alta	Media		Medio-Bassa	

Classe di pericolosità ***MEDIO-ALTA***

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta	Medio-Alta			Media
	Media	Medio-Alta		Media		
	Medio-Bassa	Media			Medio-Bassa	
	Bassa	Media		Medio-Bassa		Bassa

Riassumendo, le classi di attenzione sismica trovate sono le seguenti.

Tab. 3.23 – Classi di attenzione sismica

N°opera	Classe di attenzione sismica
Opera 1	Medio-Alta
Opera 8	Alta
Opera 15	Medio-Alta
Opera 55	Medio-Alta
Opera 67	Medio-Alta
Opera 74	Medio-Bassa

3.4 Considerazioni finali e stima della classe di attenzione complessiva

Nota la classe di attenzione, sia strutturale che sismica, delle sei opere studiate nel dettaglio, è interessante confrontare i risultati effettivamente ottenuti con le probabilità

stimate in precedenza al capitolo 2. Nelle due seguenti tabelle vengono quindi riportate le CdA effettive e stimate, rispettivamente, per la parte strutturale e quella sismica.

Tab. 3.24 – Confronto delle CdA strutturali e fondazionali

N°opera	Classe di attenzione strutturale e fondazionale	Stima delle probabilità di accadimento delle CdA				
		% CdA Alta	% CdA Medio-Alta	% CdA Media	% CdA Medio-Bassa	% CdA Bassa
Opera 1	Media	40		40	20	
Opera 8	Alta	40	40	20		
Opera 15	Medio-Alta	40	40	20		
Opera 55	Medio-Alta	40	60			
Opera 67	Medio-Alta	40	60			
Opera 74	Media	40	40	20		

Tab. 3.25 – Confronto delle CdA sismiche

N°opera	Classe di attenzione sismica	Stima delle probabilità di accadimento delle CdA				
		% CdA Alta	% CdA Medio-Alta	% CdA Media	% CdA Medio-Bassa	% CdA Bassa
Opera 1	Medio-Alta	40	60			
Opera 8	Alta	40	60			
Opera 15	Medio-Alta	40	60			
Opera 55	Medio-Alta	40	60			
Opera 67	Medio-Alta	40	60			
Opera 74	Medio-Bassa	20		60	20	

Dal confronto dei risultati ottenuti si può notare che in linea generale le probabilità stimate in precedenza vengono rispettate, ovvero che la CdA effettiva si colloca esattamente dove era prevista una probabilità di accadimento maggiore. Soltanto per l'opera 74 questa considerazione non viene confermata dato che si verificano i casi contrassegnati da una probabilità di accadimento pari al 20%. La motivazione di questo risultato è da ricercare, presumibilmente, nelle ipotesi legate al livello di difettosità. Effettivamente, si ricorda che per il calcolo delle probabilità di accadimento, il livello di difettosità è stato considerato equiprobabile ma, d'altra parte, appare evidente che l'opera 74, costruita nel 2000, possa essere stata soggetta a forme di degrado più contenute, rendendo l'ipotesi di equiprobabilità meno veritiera.

Con queste informazioni è possibile, inoltre, stimare le probabilità di accadimento della classe di attenzione complessiva. Ovviamente non sono note le informazioni relative alla parte idrogeologica per cui la CdA idraulica e frane resta ancora un'incognita. Allora

partendo dalle CdA trovate e utilizzando le tabelle già mostrate nel capitolo 2[11], si ottengono i seguenti risultati.

Tab. 3.26 – Confronto delle probabilità di accadimento della CdA complessiva

N°opera	Stima delle probabilità di accadimento delle CdA con livello di difettosità noto					Stima delle probabilità di accadimento delle CdA con livello di difettosità incognito				
	% CdA Alta	% CdA Medio-Alta	% CdA Media	% CdA Medio-Bassa	% CdA Bassa	% CdA Alta	% CdA Medio-Alta	% CdA Media	% CdA Medio-Bassa	% CdA Bassa
Opera 1		40	60			43,2	17,6	36,8	2,4	
Opera 8	100					52,8	32	15,2		
Opera 15	20	60	20			52,8	32	15,2		
Opera 55	20	60	20			56,8	36	7,2		
Opera 67	20	60	20			56,8	36	7,2		
Opera 74			80	20		44	26,4	28,8	0,8	

Come si può notare, le probabilità di accadimento della CdA complessiva cambiano significativamente dal momento in cui il livello di difettosità diventa noto. Quello che si può osservare è una forte diminuzione delle probabilità di ottenere una CdA Alta, con successivo aumento di quelle legate alla CdA Medio-Alta e Media. La motivazione dietro tale circostanza è legata alla CdA strutturale. Se quest'ultima, infatti, risultasse essere Alta, allora si avrebbe certamente un CdA complessiva Alta. Dal momento in cui il livello di difettosità diventa noto ed esclude la possibilità di una CdA strutturale Alta, le probabilità di avere una CdA complessiva Alta calano bruscamente ridistribuendosi fra le altre.

[11] Capitolo 2, par. 2.2.9, Tab. 2.8 e 2.9, p.70

Conclusioni

Per completare la trattazione svolta, si vogliono chiarire le motivazioni alla base dei risultati ottenuti.

Relativamente all'elaborazione statistica dei dati di cui si è discusso nel capitolo 2, si evidenzia che, in linea generale, le probabilità di accadimento aumentano insieme alla classe di attenzione, mostrando valori maggiori per la classe Alta. Di conseguenza, le probabilità medie denotano un andamento analogo, con valori del 68,5% di appartenere ad una classe di attenzione complessiva Alta. Tali risultati vengono spiegati sulla base delle seguenti considerazioni.

In primo luogo, è opportuno far riferimento alla tipologia di ponti principalmente presenti sul territorio marchigiano che, secondo le informazioni ottenute durante la fase di censimento, corrispondo a ponti o viadotti risalenti agli anni Ottanta, in c.a.p. e a travate semplicemente appoggiate. A causa dell'età, le opere si trovano ad oggi in prossimità della fine della loro vita utile e, nella maggior parte dei casi, non sono state soggette alle dovute manutenzioni. Lo schema strutturale a travate appoggiate è uno schema isostatico, o comunque poche volte iperstatico, che risulta essere globalmente meno sicuro dato che il raggiungimento delle condizioni critiche per pochi elementi implicherebbe il collasso dell'opera. Infine, il c.a.p. è un materiale che può nascondere alcune insidie, in particolar modo nei casi in cui esso sia post tesato; infatti, in tali circostanze le guaine di rivestimento dei cavi possono diventare sede di accumulo di umidità generando, di conseguenza, le condizioni necessarie alla corrosione degli stessi. Questa problematica, inoltre, può avvenire senza che si manifestino particolari fenomeni in superficie che possano indicarne la presenza, motivo per cui, nel caso di strutture a cavi post tesi, si rendono necessarie delle ispezioni speciali.

Secondariamente, si fa riferimento alla disponibilità della documentazione sulle opere studiate. Infatti, si può notare che le classi di attenzione ottenute dipendono esclusivamente dalle caratteristiche delle opere (strutturali, geometriche, topografiche, sismiche, ecc.), poiché in tutte le valutazioni svolte il livello di difettosità è stato considerato come un'incognita. Nel presente lavoro, però, solamente il 12% delle opere

dispone di documentazione più dettagliata. In tutti gli altri casi si deve procedere tramite la formulazione di ipotesi che, come suggeriscono le stesse Linee Guida, devono essere tendenzialmente cautelative. D'altra parte, le ipotesi cautelative sono responsabili di un incremento del rischio legato alle strutture. È evidente, allora, che la disponibilità di informazioni più dettagliate sulle opere limiti il numero di ipotesi da effettuare riducendo, quindi, la possibilità di ottenere classi di attenzione elevate. Sulla base delle osservazioni appena fatte, è possibile concludere che l'elemento centrale per l'efficienza dell'approccio proposto dalle Linee Guida, è proprio la disponibilità di documentazione sulle opere.

In definitiva, unendo le due considerazioni esplicate, risulta facile intuire come le opere del campione esaminato siano caratterizzate da una classe di attenzione spiccatamente elevata.

Rimanendo nel merito della disponibilità di documentazione, si deve sottolineare che solo 62 opere sulle 75 che componevano il campione hanno raggiunto una classe di attenzione, dato che per le altre 13 mancavano informazioni fondamentali (età dell'opera, tipologia strutturale, materiale), per le quali si è scelto di non avanzare alcuna ipotesi.

Per quanto riguarda, invece, il calcolo dettagliato della classe di attenzione trattato nel capitolo 3, dai confronti che sono stati fatti fra le probabilità di accadimento calcolate in precedenza e le classi di attenzione dettagliate, si è potuto notare che le probabilità relative alla CdA strutturale e a quella sismica vengono rispettate. Ricalcolando, invece, le probabilità della classe di attenzione complessiva avendo reso noto il livello di difettosità, si osserva che le elevate probabilità di ricadere in classe Alta che erano state riscontrate in precedenza tendono a diminuire in maniera significativa. Questo risultato mette in evidenza che il livello di difettosità è, in effetti, un parametro particolarmente rilevante nella definizione della classe di attenzione.

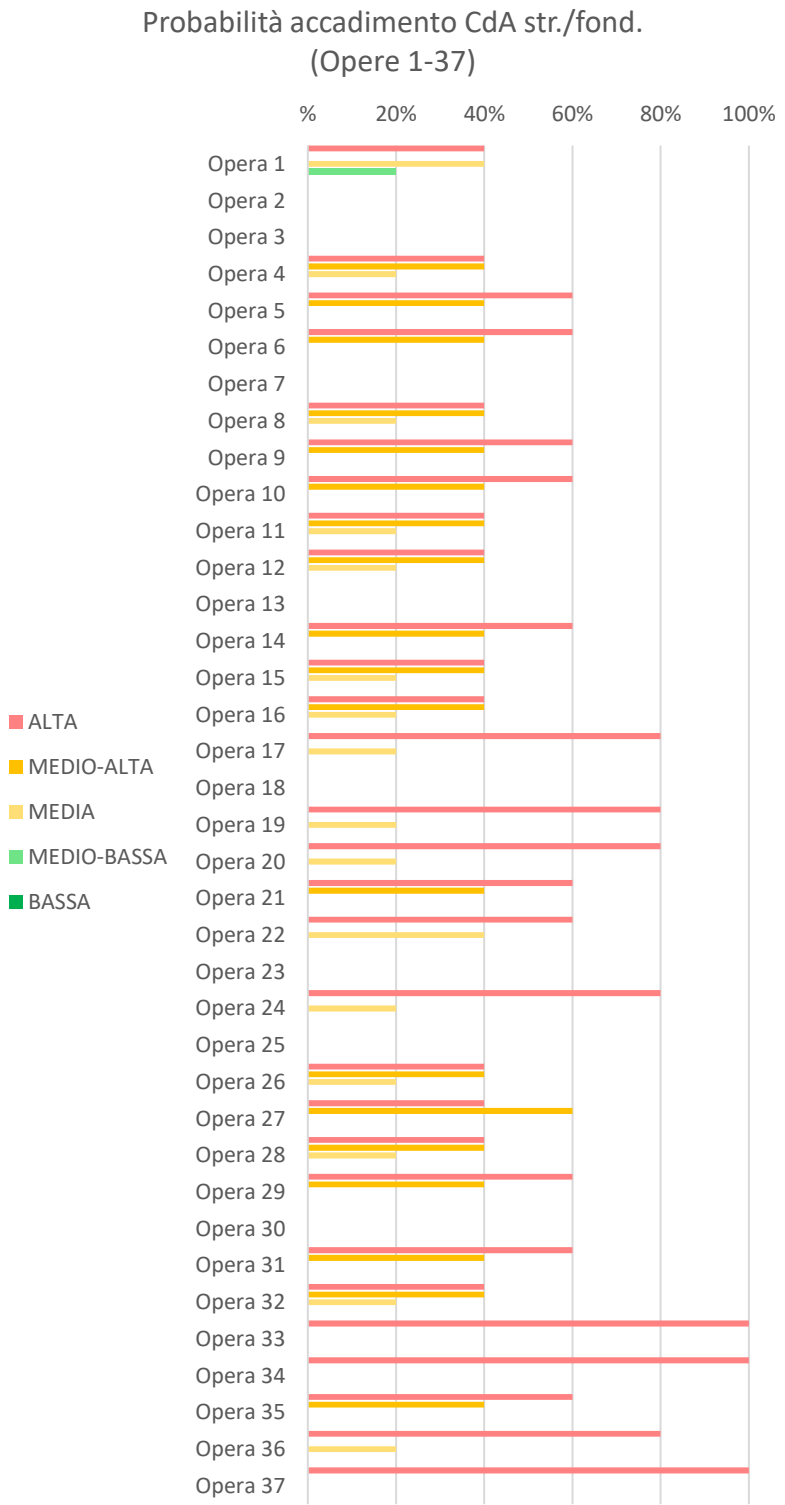
Al riguardo del livello di difettosità, si vuole sottolineare che, quando incognito, esso è sempre stato considerato equiprobabile, ai fini del calcolo delle probabilità. Questa ipotesi si è resa necessaria dal momento in cui non si disponeva di studi statistici sui livelli di difettosità. D'altra parte, però, salvo casi eccezionali, appare lecito immaginare che opere più recenti siano caratterizzate da forme di degrado più lievi e che, di conseguenza, per

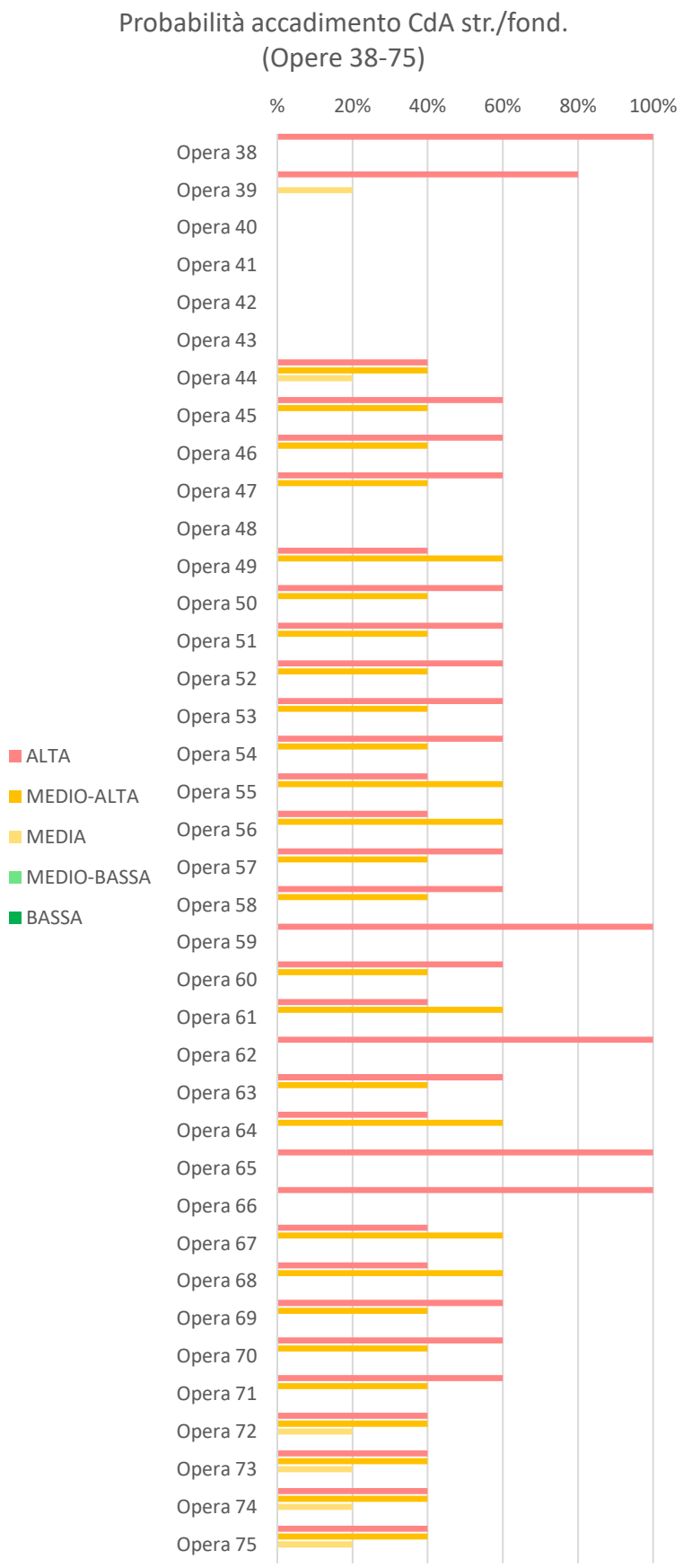
queste le probabilità di accadimento potrebbero spostarsi verso classi di attenzione più basse.

In ultimo, si vuol porre l'attenzione sui risultati delle ispezioni svolte per definire il livello di difettosità. Gran parte dei difetti riscontrati sulle opere esaminate, sono difetti di media gravità causati dalla presenza di acque meteoriche, pertanto, riconducibili ad un mancato o errato convogliamento delle acque. Chiaramente il numero di opere ispezionate è esiguo, ma d'altra parte, appare comunque rilevante il fatto che delle sei opere analizzate, tutte quante mostrano le stesse condizioni di difettosità.

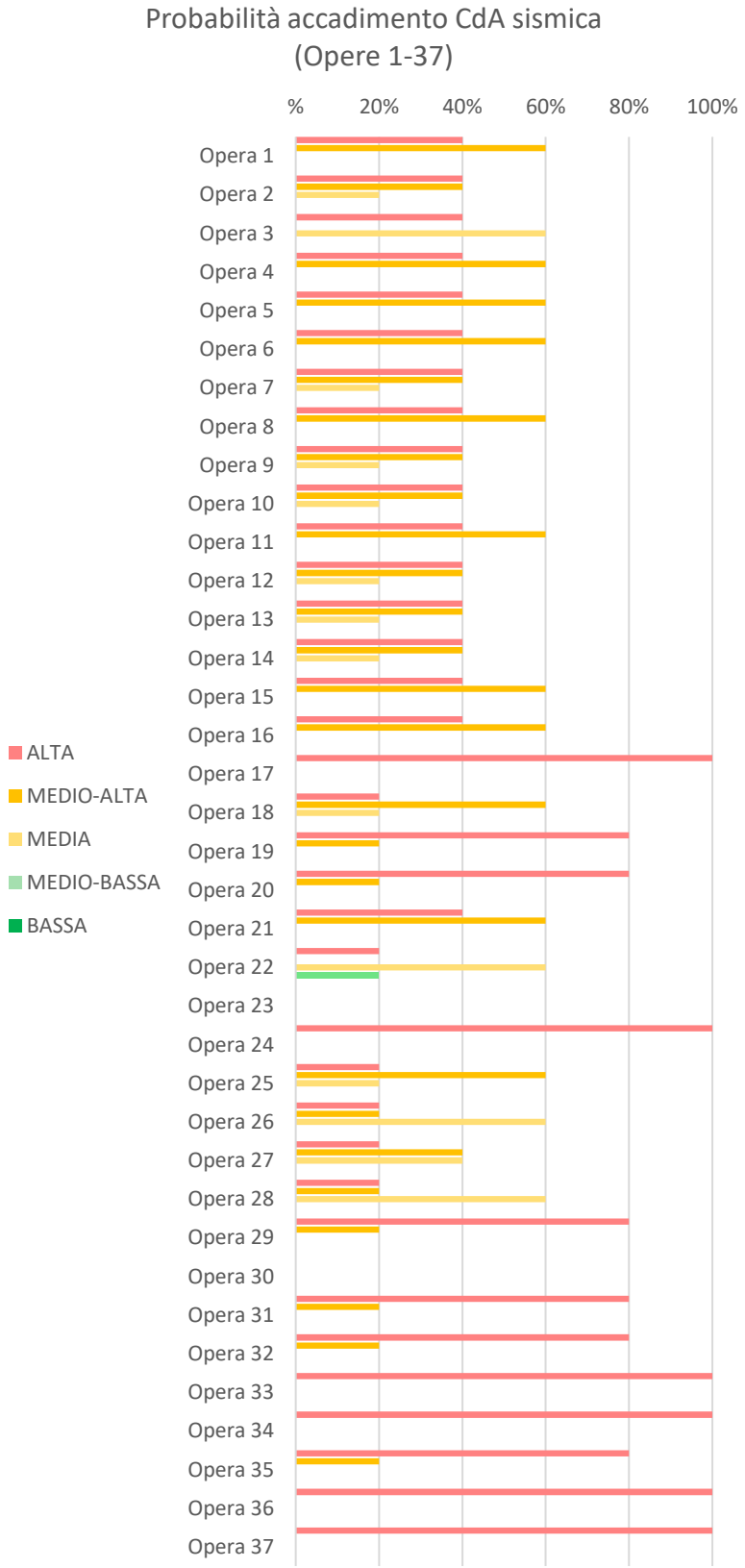
Allegati

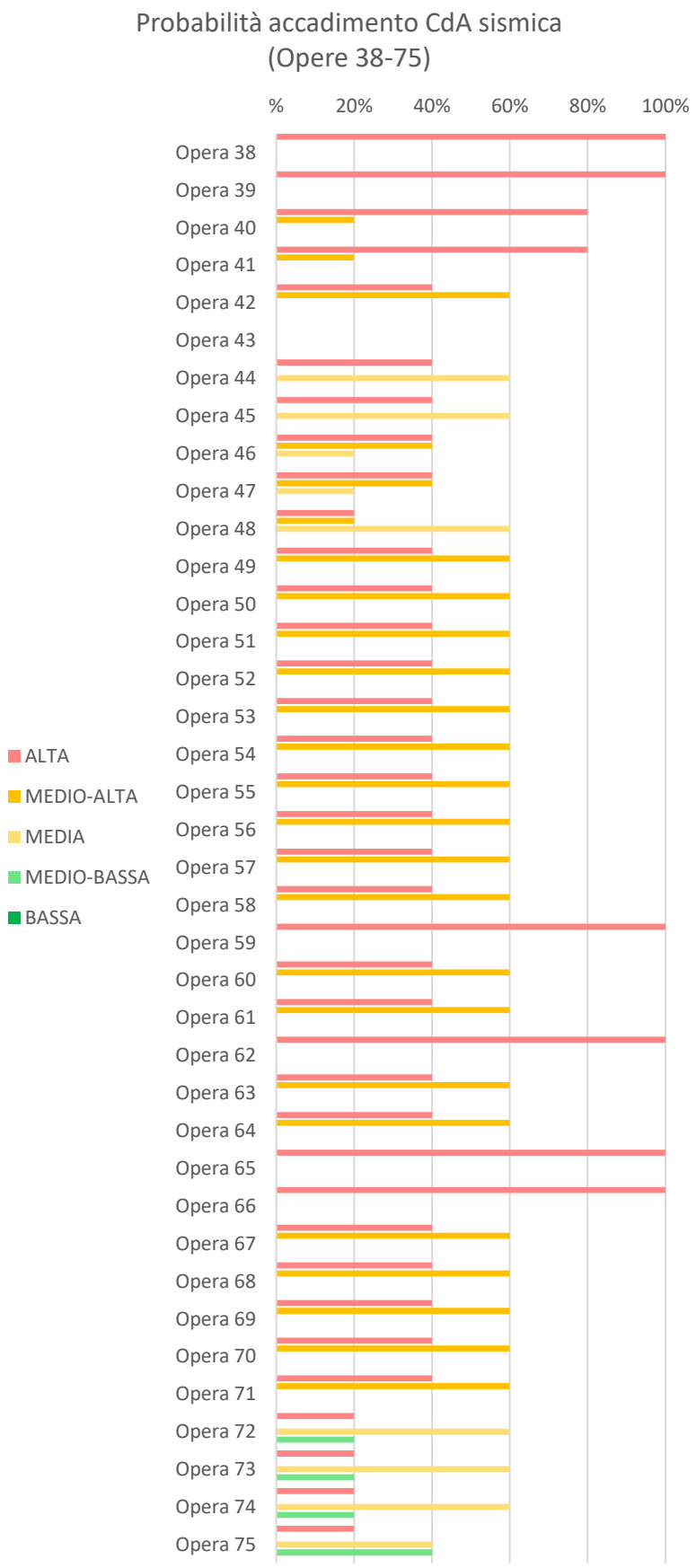
Allegato A – Probabilità di accadimento CdA strutturale e fondazionale



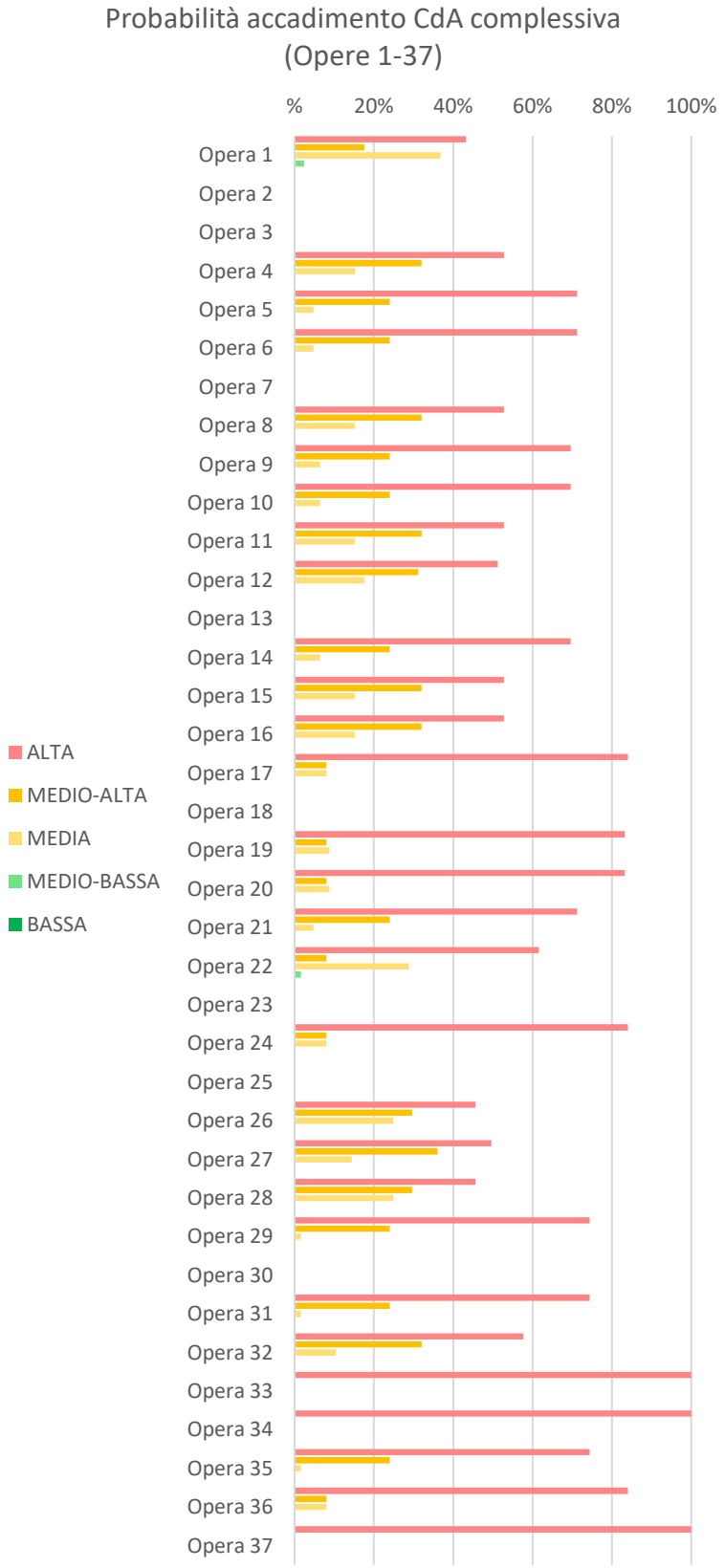

Probabilità accadimento CdA str./fond.
(Opere 38-75)
%
20%
40%
60%
80%
100%
Opera 38
Opera 39
Opera 40
Opera 41
Opera 42
Opera 43
Opera 44
Opera 45
Opera 46
Opera 47
Opera 48
Opera 49
Opera 50
Opera 51
Opera 52
Opera 53
Opera 54
Opera 55
Opera 56
Opera 57
Opera 58
Opera 59
Opera 60
Opera 61
Opera 62
Opera 63
Opera 64
Opera 65
Opera 66
Opera 67
Opera 68
Opera 69
Opera 70
Opera 71
Opera 72
Opera 73
Opera 74
Opera 75
ALTA
MEDIO-ALTA
MEDIA
MEDIO-BASSA
BASSA

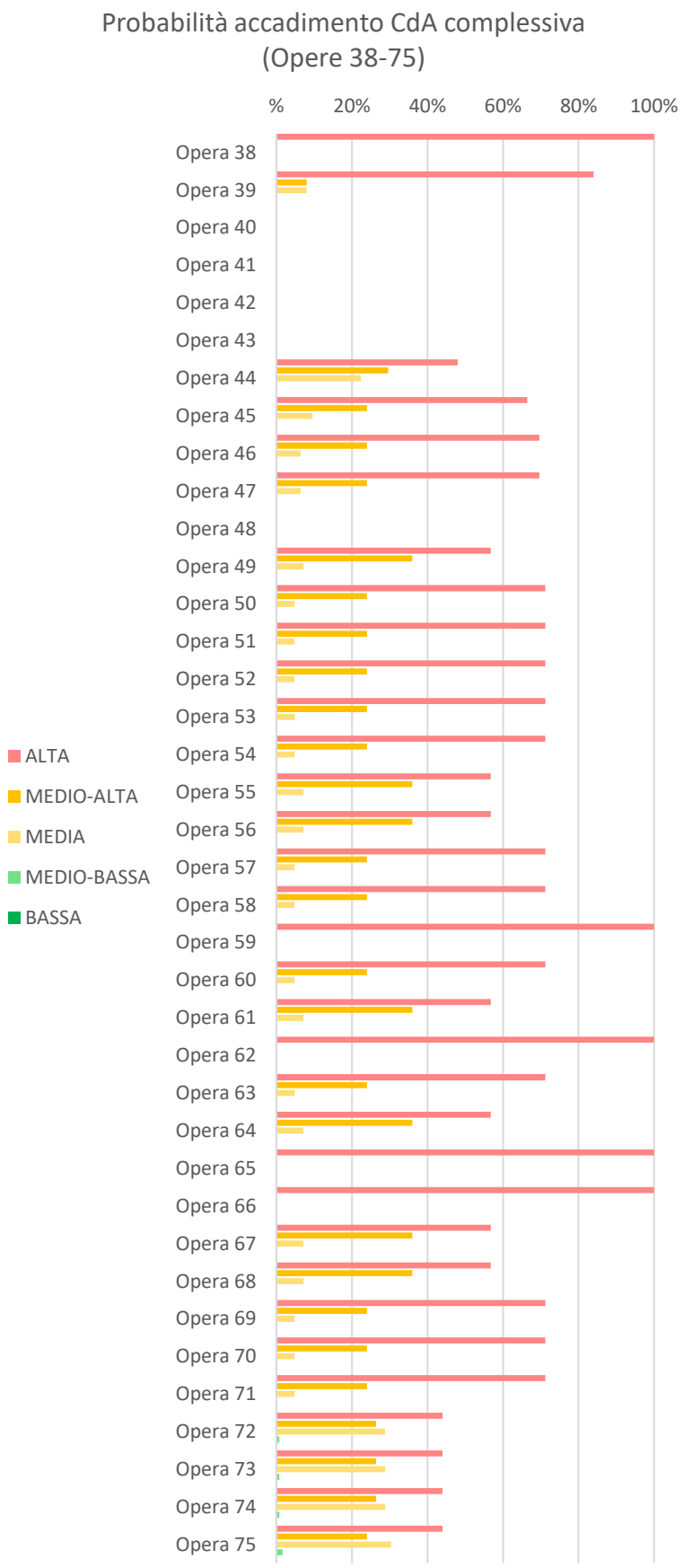
Allegato B – Probabilità accadimento CdA sismica




Probabilità accadimento CdA sismica
(Opere 38-75)
%
20%
40%
60%
80%
100%
Opera 38
Opera 39
Opera 40
Opera 41
Opera 42
Opera 43
Opera 44
Opera 45
Opera 46
Opera 47
Opera 48
Opera 49
Opera 50
Opera 51
Opera 52
Opera 53
Opera 54
Opera 55
Opera 56
Opera 57
Opera 58
Opera 59
Opera 60
Opera 61
Opera 62
Opera 63
Opera 64
Opera 65
Opera 66
Opera 67
Opera 68
Opera 69
Opera 70
Opera 71
Opera 72
Opera 73
Opera 74
Opera 75
ALTA
MEDIO-ALTA
MEDIA
MEDIO-BASSA
BASSA

Allegato C – Probabilità accadimento CdA complessiva




Probabilità accadimento CdA complessiva
(Opere 38-75)
%
20%
40%
60%
80%
100%
Opera 38
Opera 39
Opera 40
Opera 41
Opera 42
Opera 43
Opera 44
Opera 45
Opera 46
Opera 47
Opera 48
Opera 49
Opera 50
Opera 51
Opera 52
Opera 53
Opera 54
Opera 55
Opera 56
Opera 57
Opera 58
Opera 59
Opera 60
Opera 61
Opera 62
Opera 63
Opera 64
Opera 65
Opera 66
Opera 67
Opera 68
Opera 69
Opera 70
Opera 71
Opera 72
Opera 73
Opera 74
Opera 75
ALTA
MEDIO-ALTA
MEDIA
MEDIO-BASSA
BASSA

Bibliografia e sitografia

ANAS Spa. (2021). *Rientro strade*. Tratto da Stradeanas: https://www.stradeanas.it/it/le-strade/rientro-strade

ANSFISA. (2021). *Mission ANSFISA*. Tratto da Sito web ANSFISA: https://www.ansfisa.gov.it/mission

Comi, P. (2021, Febbraio 3). *Il ponte Morandi è crollato perchè costruito male, ecco le prove*. Tratto da Sito web Il Riformista: https://www.ilriformista.it/il-ponte-morandi-e-crollato-perche-costruito-male-ecco-le-prove-193176/

Corriere Adriatico. (2019, Gennaio 4). *Errori in serie sul ponte killer "Crollo dovuto alla rotazione"*. Tratto da Sito web Corriere Adriatico: https://www.corriereadriatico.it/ancona/errori_in_serie_sul_ponte_killer_crollo_dovuto_alla_rotazione-4207493.html

DeMiranda, M. (2019). *Durabilità di ponti e viadotti: come garantire la sicurezza dei ponti esistenti*. Tratto da Ingenio: https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=durabilita-infrastrutture-mario-de-miranda.pdf

Frizzarin M., Leonardi A., Franchetti P. (2020, Aprile 3). *Ponti italiani: la parola ai gestori delle reti stradali*. Tratto da Ingenio: https://www.ingenio-web.it/25035-ponti-italiani-la-parola-ai-gestori-delle-reti-stradali

G. Buratti, A. Cosentino, F. Morelli, W. Salvatore, P. Bencivenga, M. Zizi, G. DeMatteis. (2019). Alcune considerazione sull'evoluzione normativa dei cairchi da traffico nella progettazione dei ponti stradali in Italia. *XVIII Convegno ANIDIS*, (p. 1-14). Ascoli Piceno.

ISPRA. (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio.*

ISPRA. (2021). *Rapporto sulle condizioni di pericolosità di alluvione in Italia e indicatori di rischio associati.*

Lupi, M. (2015, Gennaio 15). *Sicilia, Viadotto Petrulla, il Ministro Lupi risponde.* Tratto da Le Strade dell'informazione: https://www.lestradedellinformazione.it/rubriche/news-dalle-istituzioni/sicilia-viadotto-petrulla-il-minstro-lupi-risponde

M. Di Prisco, M. Colombo, P. Martinelli, D. Coronelli. (2020, Marzo 29). *Le cause tecniche del crollo del cavlcavia di Annone.* Tratto da Ingenio: https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=150_mdplec_ita_fin.pdf

Malerba, P. (2017, Maggio 5). Lo Zen e l'arte della manutenzione dei ponti stradali. *Le Strade*, p. 97.

Ministero dei Lavori Pubblici. (1967, Luglio 19). *Circolare n. 6736/61A1.* Tratto da Edilportale: https://www.edilportale.com/normativa/circolare/1967/6736-61a1/ministero-lavori-pubblici-controllo-delle-condizioni-di-stabilit%C3%A0-delle-opere-d-arte-stradali._189.html

Ministero dei Lavori Pubblici. (1991, Febbraio 25). *Circolare n. 34233.* Tratto da Studio Petrillo: http://www.studiopetrillo.com/support/normativa_strutture/Circolare%20Ministero%20dei%20Lavori%20Pubblici%2025%20febbraio%201991,%20n.%2034233.pdf

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili. (2019, Novembre 20). *AINOP*. Tratto da Sito web del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili: https://ainop.mit.gov.it/portale#/

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili. (2020, Maggio 6). Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti. Italia.

N. Di Stefano, E. Faccin, S.G. Mantelli, F. Minelli. (2021, Novembre 26). *Valutazione dei ponti esistenti: proposta di un nuovo metodo di classificazione.* Tratto da Ingenio: https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=metodo-calissificazione-ponti-esistenti-cte-aicap-2021-6372.pdf

Pignagnoli, A. (2019, Luglio 1). *Il viadotto sul Polcevera a Genova: dall'elogio dell'inaugurazione all'oltraggio della demolizione.* Tratto da Ingenio: https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=ponte-morandi-analisi-pignagnoli-prima-parte.pdf

Reggio, R. (2018, Agosto 26). *Non solo il Morandi: negli Usa sono crollati 1062 ponti in 32 anni*. Tratto da Il sole 24 ore: https://www.ilsole24ore.com/art/non-solo-morandi-usa-sono-crollati-1062-ponti-32-anni-AExBExcF

SNPA. (2019, Novembre 26). *Dissesto idrogeologico in Italia*. Tratto da Sito web SNPA: https://www.snpambiente.it/2019/11/26/dissesto-idrogeologico-in-italia-i-dati-nel-rapporto-ispra/

Wikipedia. (2021, Aprile 20). *Ponte di Caprigliola*. Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Ponte_di_Caprigliola#Costruzione_(1905-1908)