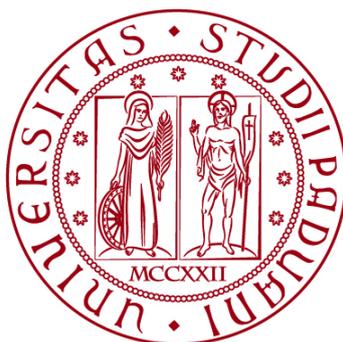


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E**  
**AMBIENTALE**

*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**VALUTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO**  
**NEI PONTI ESISTENTI:**  
**CONFRONTO CON PROCEDURE**  
**ANALOGHE E ANALISI DI CASI STUDIO**

**Relatore: Chiar.mo PROFESSOR GIOVANNI GIACOMELLO**

**Laureando: NICOLÒ RONCATO**

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024**



*A chi ha sempre creduto in me*

*Ai miei genitori*

*Omnia tempus habent*



# **Abstract**

L'elaborato di tesi ha lo scopo di illustrare i metodi attualmente impiegati per la valutazione del rischio nei ponti esistenti. Un breve stato di fatto sulla situazione infrastrutturale e normativa italiana, per quanto riguarda la gestione delle infrastrutture stradali e ferroviarie, introdurrà la trattazione.

Particolare attenzione verrà posta nel confronto con procedure analoghe per le fasi di ispezione delle infrastrutture e quantificazione del degrado sulle stesse.

Segue l'analisi di due casi studio mediante le "Linee Guida per i Ponti Esistenti" sino al "Livello 2" della medesima.



# Indice

<b>Indice delle Tabelle.....</b>	<b>IX</b>
<b>Indice delle Figure.....</b>	<b>X</b>
<b>Premessa.....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1: Infrastrutture in Italia .....</b>	<b>3</b>
1.1. Gestione delle infrastrutture in Italia .....	3
1.2. Quadro normativo italiano .....	3
1.3. Problematiche emerse dalla gestione dei ponti italiani.....	5
1.4. Interventi adottati nella gestione dei ponti.....	6
<b>Capitolo 2: Sistemi di gestione dei ponti .....</b>	<b>7</b>
2.1. Struttura dei Bridge Management System .....	7
2.2. Livelli di pianificazione dei BMS.....	8
2.3. Bridge Management System esistenti.....	8
<b>Capitolo 3: Modalità di ispezione dei ponti.....</b>	<b>11</b>
3.1. Ispezioni classiche .....	11
3.1.1. Ispezioni in Italia.....	11
3.1.2. Ispezioni negli Stati Uniti d’America.....	13
3.1.3. Ispezioni in Inghilterra .....	14
3.2. Ispezioni con droni.....	15
3.3. Ispezioni nel campo ferroviario .....	16
3.4. Classificazione delle prove distruttive e non distruttive .....	18
<b>Capitolo 4: Linee Guida per i Ponti Esistenti e per i Ponti Ferroviari Esistenti .....</b>	<b>19</b>
4.1. Linee Guida per i Ponti Esistenti .....	19
4.1.1. Sorveglianza e monitoraggio dei ponti e viadotti stradali.....	23
4.1.2. Impatto della pavimentazione stradale sulla valutazione .....	25
4.2. Linee Guida per i Ponti Ferroviari Esistenti .....	28
4.2.1. Sorveglianza e monitoraggio dei ponti e viadotti ferroviari.....	29
<b>Capitolo 5: Metodi di quantificazione del degrado nelle strutture.....</b>	<b>31</b>
5.1. Metodo del CIAS.....	31
5.1.1. Valutazione del Degrado secondo il Metodo del CIAS.....	31

5.1.2.	Programmazione degli interventi secondo il Metodo del CIAS.....	33
5.2.	Approccio Bottom-Up .....	34
5.2.1.	Valutazione del degrado secondo l'approccio Bottom-Up.....	34
5.2.2.	Programmazione degli interventi secondo l'approccio Bottom-Up.....	35
5.3.	Metodo secondo le Linee Guida per i Ponti Esistenti.....	36
5.3.1.	Valutazione del degrado secondo le Linee Guida .....	36
5.3.2.	Programmazione degli interventi secondo le Linee Guida .....	37
5.4.	Metodo secondo gli Stati Uniti d'America .....	38
5.4.1.	Valutazione del degrado secondo gli Stati Uniti d'America .....	38
5.4.2.	Programmazione degli interventi secondo gli Stati Uniti d'America .....	40
5.5.	Metodo secondo l'Inghilterra.....	41
5.5.1.	Valutazione del degrado secondo l'Inghilterra.....	41
5.5.2.	Programmazione degli interventi secondo l'Inghilterra .....	42
5.6.	Metodo secondo la Rete Ferroviaria Italiana (RFI) .....	43
5.6.1.	Valutazione del degrado secondo la Rete Ferroviaria Italiana .....	43
5.6.2.	Programmazione degli interventi secondo la Rete Ferroviaria Italiana .....	44
5.7.	Confronto tra metodi di valutazione del degrado esistenti .....	44
<b>Capitolo 6: Analisi e confronto di due casi studio .....</b>		<b>47</b>
6.1.	Caso studio 1.....	47
6.1.1.	Livello 0 .....	47
6.1.2.	Livello 1 .....	49
6.1.3.	Livello 2 .....	51
6.2.	Caso studio 2.....	57
6.2.1.	Livello 0 .....	57
6.2.2.	Livello 1 .....	59
6.2.3.	Livello 2 .....	61
6.3.	Confronto tra casi studio.....	67
<b>Capitolo 7: Conclusioni.....</b>		<b>69</b>
<b>Bibliografia .....</b>		<b>71</b>

# Indice delle Tabele

<i>Tabella 1: Frequenza minima delle ispezioni ordinarie.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabella 2: Tipi di controlli su calcestruzzi e acciai.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabella 3: Difetti presenti sulla pavimentazione stradale.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 4: Definizione delle fasce di efficienza in relazione al coefficiente TSR.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 5: Livelli di urgenza di intervento per i singoli elementi secondo ESR.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 6: Livelli di urgenza di intervento per l'intera struttura secondo.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 7: Sistema di valutazione dei Components.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabella 8: Valutazione descrittiva delle condizioni degli Elements.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabella 9: Valutazione delle condizioni del canale e delle opere di protezione.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabella 10: Valutazione di Extension e Severity del difetto.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabella 11: Confronto tra metodi di valutazione del degrado nelle strutture.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabella 12: Caso studio 1 - Sintesi della "Scheda di censimento ponti", Livello 0.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 13: Caso studio 1 - Difetti rilevati.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 14: Parametri primari e secondari per la determinazione di fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione strutturale e fondazionale.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 15: Caso studio 1 - Classificazione delle strade in funzione della massima massa ammissibile.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabella 16: Caso studio 1 - Estratto della Tabella 4.3. delle Linee Guida per determinare la Classe di Pericolosità.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabella 17: Caso studio 1 - Frequenza del transito di veicoli commerciali per singola corsia di marcia.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabella 18: Caso studio 1 - Livelli di Difettosità.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 19: Caso studio 1 - Estratto della Tabella 4.6. delle Linee Guida per determinare la Classe di vulnerabilità in funzione dello schema statico, luce, materiale e numero di campate.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 20: Caso studio 1 - Livello di Traffico Medio Giornaliero (veicoli/giorno sull'intera carreggiata).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 21: Caso studio 1 - Traffico Medio Giornaliero e luce media della campata del ponte.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabella 22: Caso studio 1 - Tipologia di ente scavalcato.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabella 23: Caso studio 1 - Estratto della Tabella 4.10. delle Linee Guida per la determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabella 24: Caso studio 2 – Sintesi della Scheda di censimento ponti, Livello 0.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabella 25: Caso studio 2 – Difetti rilevati.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 26: Caso studio 2 – Classificazione delle strade in funzione della massima massa ammissibile.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabella 27: Caso studio 2 – Estratto della Tabella 4.3. delle Linee Guida per determinare la Classe di Pericolosità.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabella 28: Caso studio 2 – Frequenza del transito di veicoli commerciali per singola corsia di marcia.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabella 29: Caso studio 2 – Livelli di Difettosità.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabella 30: Caso studio 2 – Estratto della Tabella 4.6. delle Linee Guida per determinare la Classe di vulnerabilità in funzione dello schema statico, luce, materiale e numero di campate.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabella 31: Caso studio 2 – Livello di Traffico Medio Giornaliero (veic./giorno sull'intera carreggiata).....</i>	<i>64</i>

Tabella 32: Caso studio 2 – Traffico Medio Giornaliero e luce media della campata del ponte	65
Tabella 33: Caso studio 2 – Tipologia di ente scavalcato.....	65
Tabella 34: Caso studio 2 – Estratto della Tabella 4.10. delle Linee Guida per la determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale.....	66

## Indice delle Figure

Figura 1: Giudizio di Dettaglio e Giudizio Globale (Visite di Controllo ai Ponti dell’Infrastruttura Ferroviaria - Ing. Marco Tisalvi, Ing. Andrea Vecchi).....	17
Figura 2: Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi .....	20
Figura 3: Flusso logico per la determinazione della classe di attenzione.....	21
Figura 4: Scheda di Ispezione Ponti contenuta nelle Schede di Valutazione dei Difetti.....	26
Figura 5: Approfondimento della tipologia di marciapiede con apposita Scheda di Ispezione dei Ponti, specifica per il caso di marciapiede non sormontabile .....	26
Figura 6: Esempio di Scheda Difettologica per lo stato della pavimentazione .....	28
Figura 7: Esempio di porzione di Scheda Difettologica del cls dilavato e ammalorato .....	32
Figura 8: Esempio di Scheda di Valutazione Ispettiva.....	33
Figura 9: Valori di CV in relazione al livello di deterioramento .....	34
Figura 10: Sintesi dell’algoritmo del TSR .....	34
Figura 11: Livello di Difettosità previsto dalle Linee Guida per i Ponti Esistenti .....	37
Figura 12: Valori assunti dalla CdA complessiva del ponte.....	38
Figura 13: Classi derivanti dal valore di BCI del ponte.....	42
Figura 14: Caso studio 1 - Ponte sul Muson dei Sassi, Loreggia (PD).....	47
Figura 15: Caso studio 1 - Documentazione fotografica relativa ai difetti rilevati .....	50
Figura 16: Caso studio 1 - Flusso logico per la determinazione della Classe di Vulnerabilità. 54	
Figura 17: Caso studio 1 - Flusso logico per la definizione della Classe di Esposizione.....	56
Figura 18: Caso studio 2 - “Ponte di Rustega” sul Muson dei Sassi, Loreggia (PD) .....	57
Figura 19: Caso studio 2 – Documentazione fotografica relativa ai difetti rilevati.....	60
Figura 20: Caso studio 2 – Flusso logico per la determinazione della Classe di Vulnerabilità 64	
Figura 21: Caso studio 2 – Flusso logico per la definizione della Classe di Esposizione .....	66





# Premessa

Ponti, viadotti e gallerie sono infrastrutture indispensabili per la circolazione in territori caratterizzati da una complessa orografia e dalla presenza di corsi d'acqua. L'Italia possiede una tra le reti infrastrutturali più complesse al mondo, gran parte della quale risalente al boom economico del secondo dopoguerra e quindi caratterizzate da limitate conoscenze in ambito progettuale, costruttivo e di flussi di traffico diversi rispetto a quelli odierni. L'obsolescenza di tali opere, lo stato avanzato di salute, il degrado dei materiali, la conseguenza di lacune costruttive e le condizioni ambientali in cui risiede l'opera hanno causato la perdita di prestazione delle opere. Fenomeni di natura idraulica e frane, oltre alla pericolosità sismica che interessa il territorio nazionale, sono stati spesso concausa di crolli e danni alle infrastrutture, come si è potuto osservare durante i recenti eventi meteorologici che hanno interessato la regione Veneto e l'intera penisola.

Il presente elaborato intende fornire un'occasione di confronto sulle modalità di gestione del rischio collegato ai ponti, in particolare, il primo capitolo riporta lo stato di fatto per quanto riguarda la situazione italiana di queste opere.

Il secondo capitolo descrive i moderni strumenti che la tecnologia mette a disposizione per poter agire in modo efficiente nella gestione del patrimonio infrastrutturale: il "Bridge Management System".

Il terzo capitolo offre una visione a livello internazionale della fase di ispezione delle opere quali ponti stradali e ferroviari, fase delicata per le successive fasi di gestione.

Nel quarto capitolo sarà dato spazio ai recenti approcci multilivello impiegabili nell'analisi del rischio nei ponti e viadotti stradali e ferroviari esistenti. Segue la trattazione della sorveglianza e del monitoraggio di tali opere.

Il quinto capitolo offre una panoramica sui metodi di quantificazione del degrado censito nella fase di ispezione.

Il sesto, nonché penultimo capitolo, vede l'analisi di due casi studio mediante le "Linee Guida per i Ponti Esistenti" sopra citate, con dettaglio fino alla determinazione della "Classe di rischio strutturale e fondazionale" della medesima.

Le conclusioni sono contenute nel settimo e ultimo capitolo.



# Capitolo 1: Infrastrutture in Italia

Il presente capitolo introduce la trattazione offrendo una visione dello stato di fatto infrastrutturale in Italia, con le problematiche annesse e le relative soluzioni.

## 1.1. Gestione delle infrastrutture in Italia

La competenza della rete stradale è suddivisa tra Stato, Regioni, Province, Comuni e concessionari stradali e autostradali come prescritto nel Decreto Legislativo n. 112 del 1998 “Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle Regioni ed agli enti locali”.

Secondo quanto espresso dal Conto Nazionale delle infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, redatto dal MIMS per gli anni 2019 e 2020, l'estensione della rete stradale italiana (esclusa quella comunale) era pari a 167.565 km, ripartiti in:

- Autostrade: 6.977 km, incluse quelle in gestione ANAS;
- Strade Regionali e Provinciali: 137.283 km;
- Altre strade di interesse nazionale: 23.305 km.

Attualmente si calcolano ben 840.000 km circa di rete stradale italiana complessiva, con la presenza di 2.179 gallerie, 21.072 ponti e viadotti e ben 6.320 cavalcavia.

Anche le infrastrutture ferroviarie italiane sono caratterizzate da una significativa complessità e da una vetustà media di 70 anni. In circa 18.475 km di rete gestita da RFI, sono presenti 23.566 ponti, con un'estensione di oltre 570 km totali sulla rete. I materiali di costruzione adottati sono il calcestruzzo armato e la sua variante precompressa per circa metà dei ponti, la muratura (oltre il 30%) e l'acciaio (circa il 20%) e soluzioni miste sono state adottate per la rimanente parte di opere.

I soggetti che si occupano della gestione di tali opere sono più di 8.000.

## 1.2. Quadro normativo italiano

Segue un breve excursus sulle principali norme italiane sulle infrastrutture stradali:

- Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 19 luglio 1967 n. 6736/61/AI:  
Norma tuttora vigente nata a seguito del crollo del ponte di Ariccia nel 1967. Impone agli enti gestori l'obbligo di ispezioni visive frequenti (ogni tre mesi e una volta l'anno analisi approfondite da parte di ingegneri) e la compilazione di documentazione di ispezione del patrimonio stradale;

- Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 25 febbraio 1991 n. 34233 “Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali”:  
Tratta le problematiche derivanti dalla manutenzione e gestione delle opere stradali. È un aggiornamento della Circolare del 1967 che impone agli enti gestori le attività di vigilanza, ispezione, manutenzione e interventi statici (restauro, adeguamento e ristrutturazione) delle opere d’arte;
- Decreto Legislativo n. 285 del 30/04/1992 “Nuovo Codice della Strada”: Rilasciato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, prevede l’obbligo dell’ente gestore di “provvedere alla manutenzione, gestione e pulizia della sede stradale e delle relative pertinenze per assicurare la sicurezza degli utenti”;
- Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC): aggiornato dal D.M. del 17 gennaio 2018 (NTC2018), costituisce il riferimento normativo corrente per gli operatori tecnici;
- Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, valutazione della sicurezza e monitoraggio dei ponti esistenti, rilasciate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici il 17 aprile 2020;

Per quanto riguarda le infrastrutture ferroviarie, si riportano a livello nazionale:

- Legge 5/11/1971, n.1086: Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato normale e precompresso e a struttura metallica;
- D.P.R. n. 380/2001: Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia;
- D.M. Infrastrutture del 17.01.2018: Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni;
- Circolare esplicativa del 21 gennaio 2019, n.7/C.S.LL.PP.: Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale del 17 gennaio 2018.

In ambito ferroviario si riportano:

- Procedura “Visite di controllo ai ponti, alle gallerie e alle altre opere d’arte dell’infrastruttura ferroviaria” RFI DTC PSE 44 1 1 del 27.06.2019;
- Circolare n. 8 del 10/2/1960 del Servizio Lavori e Costruzioni delle F.S: Norme riguardanti la costruzione dei ponti ad arco in conglomerato cementizio;
- Procedura “La Direzione dei Lavori negli appalti gestiti da RFI”: RFI DPR P 01 1 0 del 20/04/2018;
- “Istruzione sulla costruzione ed il controllo delle lunghe rotaie saldate (L.R.S.) EDIZIONE 2006” e s.m.i.;

- Capitolato Generale Tecnico di Appalto delle Opere Civili.

A livello europeo, sempre in ambito ferroviario:

- UNI EN 1991-2:2005 parte 2: Carichi da traffico sui ponti;
- UNI EN 1993-1: 2005 parte 1-8: Progettazione dei collegamenti;
- UNI EN 1993-1:2005 parte 1-9: Fatica;
- UNI EN 1992-2:2006 parte 2: Ponti di calcestruzzo;
- UNI EN 1337: Appoggi strutturali.

### **1.3. Problematiche emerse dalla gestione dei ponti italiani**

Le problematiche emerse nella gestione dei ponti non riguardano le opere di nuova costruzione, ma bensì quelle esistenti. L'osservazione continua dello stato di salute dei ponti e la successiva programmazione della manutenzione, in linea teorica, permettono il rapido intervento degli enti gestori e la prevenzione di potenziali crolli e cedimenti.

Al momento circa il 45% dei ponti in Italia è in capo ad Anas Spa, società di gestione delle strade statali, mentre il 20% è gestito da concessionari stradali e autostradali. Il rimanente 35% è gestito da enti locali come Regioni e Province. Questa frammentazione delle competenze rende la gestione delle opere complessa in termini di risorse monetarie (compromesso tra la garanzia di efficienza della rete viaria e l'ottimizzazione dei budget e fondi) e di priorità di intervento. La manutenzione è affrontata in modo diverso in base alla visione dell'ente, per esempio, al grande concessionario l'utilizzo del ponte genera profitto mentre per il piccolo comune è un costo diretto. Ogni ente prevede a suo modo diverse procedure di ispezione visiva delle opere per la determinazione del grado e dell'urgenza di intervento della medesima. La mancata reperibilità di informazioni condivise sulle stesse opere rende impossibile il censimento dei manufatti e la formazione di un archivio nazionale.

Analizzando invece le attuali "Norme Tecniche per le Costruzioni", per quanto riguarda il patrimonio esistente, viene imposta la verifica di sicurezza nel caso in cui vi sia una evidente riduzione della capacità resistente della struttura conseguenti ad azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni), provati errori di progetto o cambio della destinazione d'uso dell'opera.

La norma non impone la verifica delle strutture esistenti in caso di revisione della normativa o delle zonizzazioni avvenute nel tempo, ne consegue che i ponti prossimi allo scadere della loro vita utile e progettati con norme superate, qualora non presentino segni di degrado evidenti, non siano soggetti a verifica.

La definizione di “significativo degrado” impiegata nelle NTC è generica e sottoponibile ad interpretazioni soggettive. Come già sottolineato, ogni gestore prevede procedure interne per la valutazione dei ponti, non garantendo trasparenza e uniformità della stessa.

#### **1.4. Interventi adottati nella gestione dei ponti**

I tragici eventi che hanno interessato i ponti sul nostro territorio, si cita il crollo del Cavalcavia di Annone nel 2016 fino al crollo del Ponte Morandi nel 2018, hanno richiamato l’attenzione degli enti gestori sulla manutenzione e sul monitoraggio di queste opere. A seguito del collasso del Ponte Morandi di Genova sono stati presi dei provvedimenti in materia con il Decreto-legge del 28 settembre 2018 n. 109. Questo contiene le misure relative all’istituzione dell’“Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali” (ANSFISA), e dell’istituzione dell’“Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche” (AINOP). L’ANSFISA sostituisce la precedente “Agenzia Nazionale per la sicurezza delle ferrovie” (ANSF), con lo scopo di garantire una gestione terza delle opere.

Il 17 aprile 2020, il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici approva le “Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, valutazione della sicurezza e monitoraggio dei ponti esistenti”, documento innovativo che definisce una procedura multilivello e multi obiettivo per la gestione del rischio dei ponti esistenti e i requisiti per il monitoraggio dinamico degli stessi.

Il 23 agosto 2022 vengono pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale le “Linee Guida per la gestione del rischio dei ponti esistenti (rev. 2022)” e le “Istruzioni Operative per l’applicazione delle Linee Guida” redatte da ANSFISA.

## Capitolo 2: Sistemi di gestione dei ponti

La gestione dei ponti comprende tutte quelle fasi che interessano l'opera durante tutta la sua vita utile, dalla progettazione e costruzione fino alla manutenzione, atte a garantire la funzionalità e la sicurezza dell'opera per preservarla al meglio.

Le attività di manutenzione sono definite nelle normative correnti italiane ma non vengono spesso rispettate dagli enti di gestione per mancanza di fondi, dato l'elevato numero di opere e per l'assenza effettiva di uno strumento di gestione comune.

I sistemi di archiviazione manuali delle informazioni dei manufatti sono stati sostituiti da sistemi informatizzati, rendendo possibile la consultazione dei dati delle infrastrutture, ponendo una solida base per le fasi di ispezione e analisi storica.

I "Bridge Management System" (BMS) racchiudono queste informazioni e implementano strumenti e algoritmi per supportare l'ente gestore nelle fasi decisionali, dall'ispezione fino alla prioritizzazione delle attività. Ogni valutazione è effettuata su parametri tecnico-economici come il budget disponibile, lo stato di fatto della struttura e modelli di previsione del degrado.

### 2.1. Struttura dei Bridge Management System

Ogni BMS è composto dai seguenti componenti:

- Archiviazione dati: Le informazioni delle strutture sono contenute in database a loro volta organizzate in moduli. Il primo modulo contiene l'identificazione del ponte, la sua localizzazione, informazioni sul progetto e sulla costruzione, interventi passati, tipologia strutturale e geometria. Nel secondo modulo sono contenute le informazioni provenienti dalle attività di ispezione e manutenzione. Chiaramente l'accuratezza dei dati raccolti definisce l'attività dei BMS.
- Modelli di degrado: Valutano l'evoluzione del degrado nel tempo, pianificando la futura manutenzione necessaria. I modelli possono interessare la struttura sia nelle singole parti sia nella sua totalità.
- Modelli di costo: L'analisi economica, definita come "Life-Cycle Cost Analysis" (LCCA), è un criterio decisionale che analizza tutti i costi necessari alla gestione del ponte. La LCCA consente di ottimizzare il budget economico destinato all'opera in relazione alle alternative di manutenzione della stessa.
- Modelli di analisi e ottimizzazione: Definiscono le priorità di intervento sulle opere esistenti a livello di rete, mentre a livello di progetto vengono scelti i metodi di

ripartizione per ogni ponte. Le Linee Guida per la sicurezza dei ponti sono un esempio di integrazione di questi due livelli di analisi.

- Funzioni di aggiornamento: Gestiscono le decisioni prese nella programmazione dal punto di vista temporale.

## **2.2. Livelli di pianificazione dei BMS**

L'obiettivo dei BMS è di individuare la strategia ottimale per garantire un adeguato standard di sicurezza a parità di limitate risorse economiche, per tutta la vita utile della struttura presa in esame. I BMS si compongono di due livelli di pianificazione delle attività:

- Network Level: È prevista l'ottimale pianificazione della manutenzione del ponte a livello di rete con considerazioni di tipo economico e strategico, attraverso il confronto delle opere costituenti la rete;
- Project Level: a differenza del Network Level, la pianificazione della manutenzione interessa la singola opera, isolata dal contesto viario in cui risiede.

I più recenti BMS presentano algoritmi che, combinando i due livelli decisionali sopra descritti, ottimizzano la fase di indagine.

## **2.3. Bridge Management System esistenti**

Attualmente sono presenti diversi software BMS a sostegno dell'operato degli enti gestori, disponibili commercialmente al pubblico o sviluppati internamente dagli enti gestori. I software più conosciuti sono:

- AASHTOWare Bridge Management: chiamato anche "Pontis", è un sistema di gestione dei ponti operativo dal 1992 negli USA e attualmente adottato in circa 50 suoi stati. È uno dei BMS più avanzati presenti oggi, nato dalla collaborazione tra la "Federal Highway Administration" (FHWA) con il database del "National Bridge Inventory" (NBI);
- BridgeStation: Impiegato in Inghilterra, sfrutta il "Guidance Document for Performance Measurements of Highway Structures" per calcolare gli indici di degrado delle strutture;
- PROPonti: È la trasposizione italiana del software "Pontis" americano. È il primo software in Italia ad integrare i livelli di analisi 0, 1 e 2 specificate dalle "Linee Guida sui Ponti Esistenti". La versione internazionale di PROPonti si basa invece sulle linee guida della "Highways Agency" in Inghilterra.
- DANBRO+: Sistema di monitoraggio dei ponti impiegato in Danimarca di tipo commerciale;

- German Bridge Management System: Nato dal “Federal Highway Research Institute” (BASt);
- IRBM Railway: “Integrated Railway Bridge Management”, è un sistema di gestione specifico per i ponti ferroviari che integra sia gli aspetti della manutenzione sia della gestione delle reti ferroviarie;
- DOMUS (Diagnostica Opere d’arte Manutenzione Unificata Standard): BMS proprietario di RFI.

In Italia, come già sottolineato, i gestori infrastrutturali come ANAS S.p.a. e la Provincia Autonoma di Trento provvedono ad utilizzare sistemi di gestione interni.



## Capitolo 3: Modalità di ispezione dei ponti

La vita di un ponte deve essere monitorata costantemente fino al suo decadimento che può essere naturale, cioè, determinato da fattori economici, oppure provocato da eventi eccezionali quali crolli, atti di sabotaggio ecc.

L'ispezione visiva si rivela essere una fase determinante nel programma di manutenzione delle opere d'arte stradali e ferroviarie in quanto da essa scaturiscono tutte le iniziative future per una corretta gestione del patrimonio, richiedere ulteriori sopralluoghi con esperti e lo svolgimento di prove sperimentali fino alla limitazione della viabilità.

La funzione dell'ispezione non è di determinare le cause o la pericolosità del difetto in sé, ma bensì di osservare in modo attento l'opera e di identificare quanto rilevabile a vista o con semplici strumenti.

Da questa premessa si deduce che l'ispezione deve essere eseguita in modo rigoroso e ad intervalli temporali regolari su ogni elemento che forma l'opera. Oltre all'individuazione del degrado e delle relative cause ed effetti, questa fase permette di definire le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria. Il ritardato intervento sulle opere produce danni nel tempo e costi superiori da sostenere da parte dell'ente.

In questo capitolo verranno descritte le modalità di ispezione visiva adottate nei principali Stati del mondo. Verrà inoltre trattato l'innovativo approccio alle ispezioni con droni.

### 3.1. Ispezioni classiche

#### 3.1.1. Ispezioni in Italia

Come indicato nelle Linee Guida per i Ponti, sono previste ispezioni periodiche ordinarie ed ispezioni straordinarie caratterizzate da maggiore grado di approfondimento. La documentazione prodotta deve essere registrata nei BMS. Se necessario, le ispezioni sono accompagnate dall'esecuzione di prove non distruttive e semidistruttive (trattate nel Capitolo 3.4.). In particolare, si definiscono:

- Ispezioni ordinarie: Rientrano nelle indagini di Livello 1 delle Linee Guida per i Ponti. Sono eseguite con frequenze minime in relazione al tipo di manufatto e della "Classe di Attenzione" come esplicitato nella Tabella 1. Queste ispezioni possono avvalersi di terminali elettronici/digitali come tablet e palmari ed è raccomandata l'esecuzione di test non distruttivi come prove sclerometriche, misure di umidità e pH. È concesso l'utilizzo di droni. I dati raccolti sono documentati nei modelli di schede presenti nell'"Allegato B"

delle Linee Guida. Inoltre, hanno lo scopo di attribuire un valore numerico o quantitativo rappresentativo dello stato di condizione di ogni elemento sotto indagine e per l'opera complessiva, chiaramente mediante BMS. Inoltre, orientano le modalità future di indagine straordinarie, la scelta dei programmi di monitoraggio e le verifiche di sicurezza.

*Tabella 1: Frequenza minima delle ispezioni ordinarie*

<b>CDA</b>	<b>Bassa</b>	<b>Medio-Bassa</b>	<b>Media</b>	<b>Medio-Alta</b>	<b>Alta</b>
<b>Frequenza Opere “Tipo 1”</b>	Biennale	18 mesi	Annuale	In funzione del monitoraggio o semestrale	In funzione del monitoraggio o semestrale
<b>Frequenza Opere “Tipo 2”</b>	Annuale	9 mesi	Semestrale	In funzione del monitoraggio o trimestrale	In funzione del monitoraggio o trimestrale

Dove: Tipo 1: Opere d'arte precedentemente inserite in un sistema di monitoraggio conforme alla Circolare n. 6736/61/AI del 1967; Tipo 2: opere nuove e/o in esercizio da diversi anni senza precedenti ispezioni periodiche.

- Ispezioni straordinarie: Hanno lo scopo di acquisire informazioni approfondite sui fenomeni di degrado che interessano la struttura qualora si siano verificati eventi eccezionali come incidenti, sismi, alluvioni e frane e quando i modelli predittivi evidenzino comportamenti anomali del degrado. Le ispezioni straordinarie devono essere eseguite non oltre 60 giorni da quando ne venga resa nota la necessità. Nel caso di manufatti con Classe di Attenzione “Bassa” e “Medio-Bassa” le ispezioni devono avvenire non oltre i 5 anni dalla precedente ispezione, mentre per gli altri casi è sufficiente ogni 2 anni. Le ispezioni devono essere accompagnate da prove non distruttive per accertare l'origine, lo stato e l'evoluzione dei difetti presenti. Sono previste prove di carico statiche e rilievi della risposta dinamica. Tutto il materiale prodotto deve essere documentato in un rapporto reso accessibile nel BMS.
- Ispezioni speciali: Ispezioni previste quando il degrado presente nella struttura potrebbe comprometterne la stabilità. Le opere soggette a queste ispezioni sono le strutture precomprese a cavi post-tesi e iniettati (in particolare degli anni '60 e '70), opere soggette allo scalzamento delle pile e delle spalle a causa di una mancata protezione di questi elementi in alveo. Sono raccomandate ispezioni subacquee in quanto i fenomeni di

deposizione di materiale fine impossibilitano l'osservazione dei fenomeni di scavo. Si valutano inoltre gli argini e le opere di laminazione in prossimità del ponte. Queste ispezioni sono obbligatorie a seguito di eventi di piena.

### **3.1.2. Ispezioni negli Stati Uniti d'America**

Negli Stati Uniti sono previste sette tipologie di ispezione dei ponti, definite dall'“AASHTO Manual for Bridge Evaluation” e in accordo con la “Federal Highway Administration”. Si specifica che ogni ispezione viene pianificata considerando le variazioni di condizioni del sito, come il traffico veicolare, pedonale, navale e il tempo atmosferico. Le informazioni raccolte durante le ispezioni sono necessarie per valutare le condizioni strutturali e funzionali dell'opera per stabilire la priorità di intervento. I metodi di valutazione delle condizioni dei ponti sono stati stabiliti dall'FHWA.

L'ispezione si compone delle seguenti fasi:

- Visual Examination: Raccolta delle informazioni tramite esame visivo sui singoli componenti della struttura in base ai difetti presenti e visibili come corrosione, abrasione, esposizione dell'armatura etc.;
- Operational Examination: Ogni componente viene visionato durante il funzionamento del ponte per individuare le prestazioni generali, vibrazioni e fenomeni insoliti;
- Measurement Examination: Confronto tra misurazioni recenti attuate con rilievi standard e misurazioni precedenti per evidenziare l'evoluzione dei difetti;
- Special Examination: I singoli componenti della struttura vengono sottoposti ad indagini non distruttive di tipo meccanico ed elettrico (ultrasuoni etc.).

Nel dettaglio, le sette ispezioni sono:

- Initial Inspection: Valutano la condizione dell'opera esistente, i parametri operativi per distinguere le condizioni di degrado stabili e le condizioni che possono peggiorare nel tempo e richiedere quindi successive visioni. Tale ispezione viene effettuata quando si realizza una nuova struttura, notificandone la presenza all'archivio dati “NBI” Americano e quando la struttura subisce un cambio di configurazione o interventi migliorativi;
- Routine Inspection: Ispezioni che comprendono la “Visual Examination” e l'“Operational Examination”. Non prevedono le altre tipologie di ispezioni sopra elencate. Prevedono l'ispezione di eventuali sistemi meccanici, idraulici ed elettrici senza lo smontaggio degli stessi;

- Damage Inspection: Stabiliscono se la struttura viaria necessita di limitazioni o chiusura del traffico e di interventi di riparazione in base al danno rilevato dalle precedenti ispezioni;
- In-Depth Inspection: Comprendono le “Routine Inspection”, le “Measurement Examination” e le “Special Examination” in quanto si ricercano difetti non riconoscibili con altri metodi di approccio. Prevede lo smontaggio dei sistemi meccanici, idraulici ed elettrici e prove non distruttive;
- Fracture Critical Inspection: Condotta per ponti in acciaio per individuare gli elementi critici soggetti a frattura;
- Underwater Inspection: Eseguita sul canale dove poggia la struttura e sulla sua porzione sommersa;
- Special Inspection: Per monitorare un difetto presente o sospetto del ponte.

La frequenza con cui vengono condotte queste ispezioni è di 24 mesi per le “Routine Inspection”, di 6 anni per le “In-Depth Inspection”. Si prevedono le “Special Inspection” solo se necessarie. I sistemi meccanici, idraulici ed elettrici richiedono ispezioni più frequenti.

### **3.1.3. Ispezioni in Inghilterra**

L’“Highway Agency” definisce per l’Inghilterra le ispezioni atte a monitorare la salute delle infrastrutture, in particolare, sono cinque:

- Safety Inspection: Identificano i segni di degrado dannosi alla viabilità e che necessitano di un intervento urgente. Interessano elementi come le carreggiate, le strutture di drenaggio, l’illuminazione e i marciapiedi. Sono eseguite con maggiore frequenza rispetto alle altre ispezioni;
- General Inspection: Interessano tutte le parti della struttura senza l’ausilio di strumenti esterni per misure specifiche. Sono soggette le aree potenzialmente dannose in prossimità della struttura come i corsi d’acqua e le parti del manufatto a contatto con esso. Sono eseguite a distanza con binocoli o droni. Hanno una frequenza minima di due anni;
- Principal Inspection: Prevedono un’indagine visiva approfondita eseguita a distanza ravvicinata su tutte le parti raggiungibili della struttura. Includono l’analisi delle cause di fenomeni di erosione e inondazione, con la possibilità di eseguire test intrusivi e blocco del traffico. Vengono eseguite con intervalli di sei anni;
- Special Inspection: Queste ispezioni interessano parti o elementi della struttura segnalati nelle precedenti ispezioni e/o particolarmente danneggiati. Sono previste con frequenza

annuale per valutare la variazione di degrado a seguito di eventi gravosi come traffico anomalo o alluvioni;

- Inspection for assessment: Si tratta di un'ispezione per procedere alla valutazione strutturale nel dettaglio.

Possono essere previste inoltre le “Underwater Inspection” per le strutture che possiedono parti strutturali a contatto con l'acqua.

La “Highway Agency” definisce le procedure di ispezione per strutture ad alto rischio come le strutture precomprese a cavi post tesi.

### **3.2. Ispezioni con droni**

A causa della morfologia del territorio e delle caratteristiche geometriche della struttura, alcune opere risultano non essere predisposte all'ispezione neppure con mezzi speciali. L'utilizzo di droni consente il rilievo 3D della struttura a partire da dati geometrici noti come piante, prospetti, sezioni e la tipologia di degrado, permettendo il riconoscimento e la catalogazione automatica dei difetti rilevati con la possibilità di pesatura dei medesimi, evitando operazioni manuali da parte dell'ispettore.

Le tecnologie di acquisizione dati determinanti in tali contesti sono:

- Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Prevedono l'utilizzo di camere montate su droni per ottenere fotografie ad alta risoluzione in caso di posizioni difficilmente raggiungibili;
- Terrestrial Laser Scanner (TLS): Sfruttano i laser scanner per ottenere nuvole di punti. Richiedono il posizionamento su superfici piane e fisse. I risultati ottenuti sono più precisi rispetto ai rilievi UAV, con accuratezza dell'ordine del centimetro.

Il difetto di tali metodologie è la necessità di una post elaborazione dei dati raccolti per la restituzione tridimensionale della struttura oggetto di ispezione.

Si definisce con “odometria” la determinazione della posizione e dell'orientamento in tempo reale di un oggetto tramite la mappatura di superfici, con risultato finale una nuvola di punti.

Brevemente, l'odometria si distingue in:

- Odometria Visiva (VO): Sfrutta le immagini acquisite in sequenza dalla camera presente su un dispositivo;
- Odometria Visiva Inerziale (VIO): Sfrutta una camera abbinata ad un sistema inerziale detto “Inertial Measurement Unit” (IMU);
- Odometria LiDAR (LO): Sfrutta un laser scanner presente sul dispositivo;

- Odometria LiDAR con Normal Distribution Transform (NDTO): Sfrutta un laser scanner presente sul dispositivo e un algoritmo “NDT” per calcolare la variazione tra frame delle nuvole di punti e associare ad esse funzioni di densità di probabilità.

Con restituzione fotogrammetrica si intende invece il procedimento con il quale si perviene alla rappresentazione grafica o numerica partendo dai fotogrammi raccolti da un rilievo aereo di una data struttura.

In linea generale, l’ispezione di un ponte tramite droni prevede una prima fase di sorvolo della struttura avendo prestabilito il tracciato e lo schema di acquisizione dei dati. Le immagini devono essere acquisite ad intervalli regolari garantendo una sovrapposizione minima del 65% e una differenza di angolazione massima del 15% tra due foto consecutive. I dati ricavati vengono inseriti in appositi software per la generazione del modello digitale tridimensionale su cui è possibile interagire per ottenere informazioni riguardanti l’estensione di aree ed elementi, evidenziando i possibili difetti rilevabili.

### **3.3. Ispezioni nel campo ferroviario**

Le ispezioni visive in ambito ferroviario hanno la finalità di garantire un controllo sistematico sulle condizioni statiche dei manufatti, fornendo elementi di giudizio sulle condizioni di stabilità e conservazione dell’opera al fine di adottare tutti i provvedimenti necessari a garantire l’efficienza della struttura e delle sue componenti. Le ispezioni prevedono tre fasi:

- Preparazione alla visita: Raccolta di documentazione progettuale, rilievi geometrico e strutturali, punti soggetti a dissesto idrogeologico e idraulico ecc., visite precedenti;
- Esecuzione della visita: Si monitora lo stato della sovrastruttura ferroviaria e dei luoghi ad essa correlata;
- RegISTRAZIONI sullo stato di conservazione delle principali opere d’arte: Viene stabilito il giudizio sulla salute dell’opera ed eventuali limitazioni su velocità e carico dei mezzi.

I riferimenti normativi in ambito ferroviario di interesse per quanto riguarda la fase di ispezione dei ponti è il DTC PSE 44 1 0: “Visite di controllo ai ponti, alle gallerie e alle altre opere d’arte dell’infrastruttura ferroviaria”, in vigore dal 06.06.2016 e il DPR MO SE 03 1 0: “Metodologia Operativa, Compilazione dei verbali di visita alle opere d’arte”, in vigore dal 01.01.2018. Questi prevedono:

- Visite Periodiche Ordinarie: Con intervalli annuali per le opere risultate interamente integre in termini di sicurezza e regolarità di circolazione dei treni, e ad intervalli semestrali per le opere in cui sono state riscontrate anomalie, deficienze o caratterizzate da limitazioni di esercizio;

- Visite Periodiche Speciali: Condotte prevalentemente sulle opere di nuova costruzione, a loro volta si suddividono in:
  - a. Principali: Ad intervalli triennali, viene effettuata la registrazione dei difetti presenti sulla struttura mediante il sistema BMS (DOMUS), sostituendo la visita ordinaria prevista nel medesimo anno;
  - b. Generali: Ad intervalli sessennali con la registrazione dei difetti tramite BMS (DOMUS). Sostituisce le visite ordinarie principali previste nel medesimo anno. Deve essere eseguita a “distanza di contatto” rispetto all’opera oggetto di ispezione, mediante mezzi d’opera adatti al superamento degli ostacoli.
- Visite Straordinarie: Operabili a seguito di eventi eccezionali quali alluvioni, terremoti e piene. In caso di necessità sono richieste ulteriori visite di carattere specialistico.

L’esecuzione della visita di tipo Principale e Generale riguarda:

- Stato della sovrastruttura ferroviaria: Per la verifica dello stato del binario, dei camminamenti, dei parapetti e la presenza di messa a terra delle masse metalliche;
- Stato dei luoghi in corrispondenza dell’opera: Per i sottovia si verifica la possibilità di inscrivere la sagoma dei veicoli e l’eventuale presenza di idonea segnaletica;
- Stato dei luoghi in corrispondenza dei corsi d’acqua: Sono ricercate le modifiche subite nel tempo a causa del corso d’acqua, la divagazione dell’alveo di magra a causa di piene, depositi di sedimenti, ostruzione delle luci del ponte e stato di salute delle fondazioni.

Tutte le registrazioni sullo stato di fatto delle opere vengono riassunte da un “Giudizio Globale” (ai sensi della DTC PSE 44 1 0) e un “Giudizio di Dettaglio” (ai sensi della DPR MO SE 03 1 0) visibili in Figura 1. In base al Giudizio di Dettaglio ottenuto è possibile provvedere all’aumento delle ispezioni visive, alla limitazione del carico e della velocità del treno.

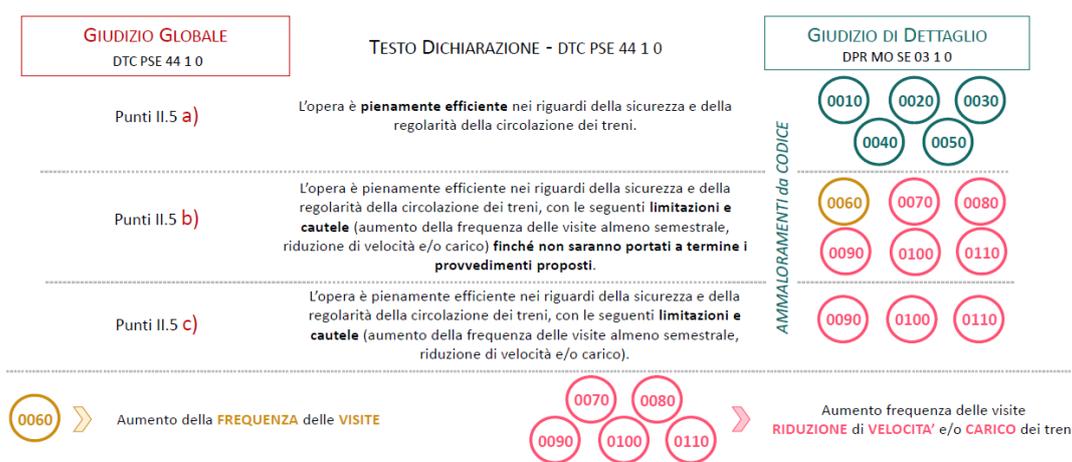


Figura 1: Giudizio di Dettaglio e Giudizio Globale (Visite di Controllo ai Ponti dell’Infrastruttura Ferroviaria - Ing. Marco Tisalvi, Ing. Andrea Vecchi)

### 3.4. Classificazione delle prove distruttive e non distruttive

Le prove si suddividono a seconda dell'entità del danno che la loro esecuzione provoca sul manufatto, come visibile nella Tabella 2.

*Tabella 2: Tipi di controlli su calcestruzzi e acciai*

<b>Tipi di prove</b>	<b>Calcestruzzo</b>	<b>Acciaio</b>
<b>Distruttive (D)</b>	Carotaggio	Ispezione puntuale, Elettrochimiche, Pressiometriche di tenuta guaine
<b>Moderatamente distruttive (MD)</b>	Microcarotaggio, Pull out, Windsor, Sclerometro	Endoscopia
<b>Non distruttive (ND)</b>	Ultrasuoni	Radioscopia

Un'ulteriore classificazione si riferisce all'oggetto delle prove, nonché il materiale, lo stato tensionale di uno specifico elemento o lo stato complessivo del ponte.

Tutti i controlli che si protraggono per tutta la vita del ponte sono intesi come monitoraggio e diagnostica del medesimo. Per ponti di nuova costruzione è richiesto il monitoraggio permanente per elementi come le luci e lo schema statico.

# Capitolo 4: Linee Guida per i Ponti Esistenti e per i Ponti Ferroviari Esistenti

Il presente capitolo tratta le linee guida attualmente presenti o in caso di sperimentazione (per i ponti ferroviari) per la valutazione e gestione del rischio nei ponti esistenti. Verranno approfondite le attività di sorveglianza e monitoraggio delle opere infrastrutturali previste dai metodi multilivello sopra citati. Verrà posta particolare attenzione, nel caso di ponti e viadotti stradali, all'influenza delle condizioni della pavimentazione stradale sull'esito della valutazione del degrado.

## 4.1. Linee Guida per i Ponti Esistenti

Le “Linee Guida per la gestione di ponti e viadotti esistenti” consistono in un approccio multilivello che prevede valutazioni speditive a ponti esistenti a livello locale e valutazioni accurate applicate su un numero di opere selezionato mediante la definizione di “Classi di Attenzione”, formate sulle valutazioni di rischio su: “Pericolosità, Vulnerabilità, Esposizione”.

L'approccio si sviluppa dal “Livello 0” al “Livello 5”, con grado di dettaglio crescente. I tre principali temi trattati dalle Linee Guida sono:

1. Censimento e classificazione: Compresi nei i primi tre livelli (0, 1 e 2) di analisi;
2. Valutazione della sicurezza: “Livello 4” dell'approccio;
3. Attività di sorveglianza e monitoraggio: Pianificata in funzione della “Classe di Attenzione” complessiva dell'opera.

In Figura 2 è visibile lo schema logico dell'approccio multilivello. Si riportano in breve i livelli che compongono le Linee Guida.

Il “Livello 0” prevede il censimento di tutte le opere mediante l'analisi di documentazione disponibile a livello archivistico e di banche dati territoriali, compilando per ogni ponte una “Scheda di Censimento” contenente i dati utili per le successive fasi di valutazione, strutturata in coerenza con l'Archivio Nazionale delle Opere Pubbliche.

Le informazioni del censimento sono integrate se necessario da ispezioni visive in situ previste dal “Livello 1”. Questa fase permette di rilevare l'attuale stato di fatto della struttura, individuando con “Schede di Rilievo” la presenza e la severità di fenomeni di degrado e di difettosità sulla medesima. Si rilevano inoltre le potenziali condizioni di rischio associate ad eventi franosi o ad azioni idrodinamiche.

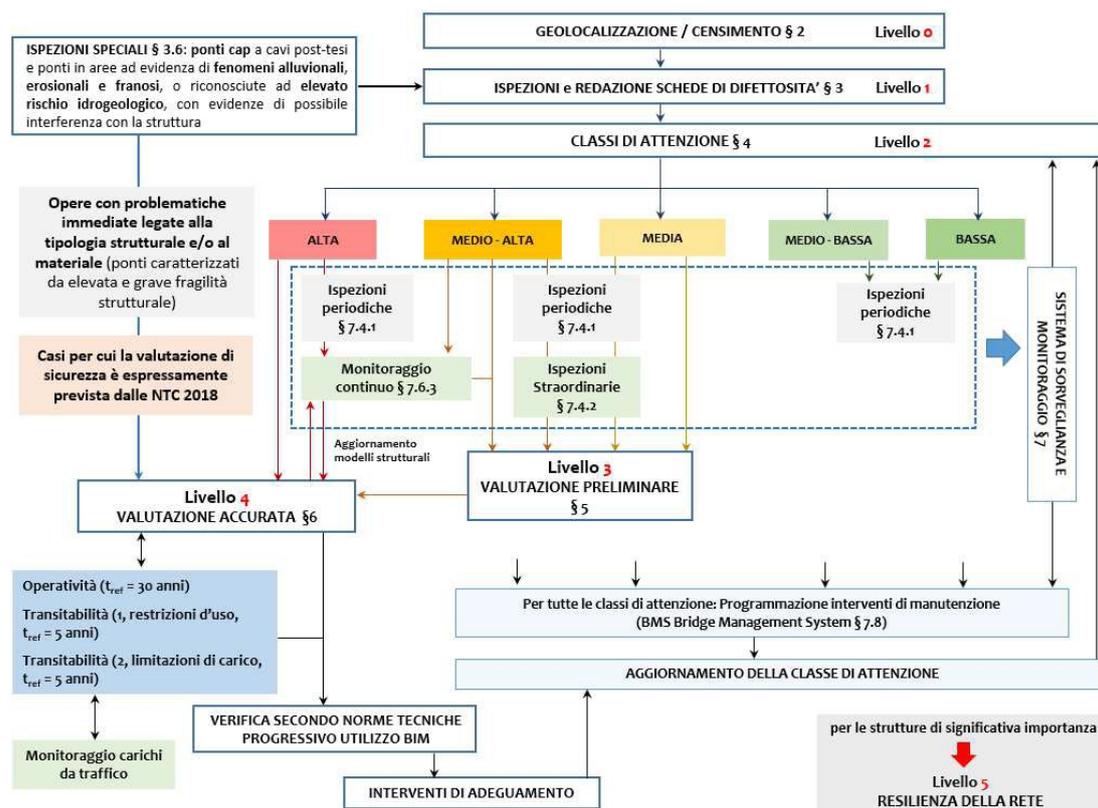


Figura 2: Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi

Il “Livello 2” rappresenta il focus centrale dell’intero approccio in quanto dai risultati ottenuti in questa fase di classificazione dipenderanno i provvedimenti futuri sulla struttura e la relativa applicazione dei Livelli successivi.

La classificazione prevede la determinazione della cosiddetta “Classe di Attenzione complessiva”, risultato della combinazione di quattro distinte “Classi di Attenzione” (*CdA*) legate a quattro differenti tipologie di rischio:

- Rischio strutturale e fondazionale;
- Rischio sismico;
- Rischio frane;
- Rischio idraulico.

Ogni *CdA* è il risultato della combinazione di fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, determinata grazie flussi ed operatori logici.

Si specifica che tale metodo non consente di raggiungere l’accuratezza di un’analisi di rischio completa.

Operativamente, per ognuna delle quattro tipologie di rischio sopra citate sono individuati i parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, a loro volta definibili con parametri principali e secondari definiti nei precedenti livelli. A seconda del valore dei parametri primari,

con opportuni range e criteri definiti si individuano cinque classi di quantificazione dei tali: Bassa; Medio-Bassa; Media; Medio-Alta; Alta.

Tali classi vengono poi corrette tramite flussi logici dal valore dei parametri secondari, con la possibilità di aumentare o diminuire di un livello la classe dei parametri primari permettendo di individuare la classe di pericolosità, di vulnerabilità e di esposizione del ponte, oppure rimangano invariati. La combinazione di tali classi fornisce la “Classe di Attenzione” dell’opera descritta anch’essa con le cinque quantificazioni sopra citate. Si riporta in Figura 3 il flusso logico per determinare le classi.

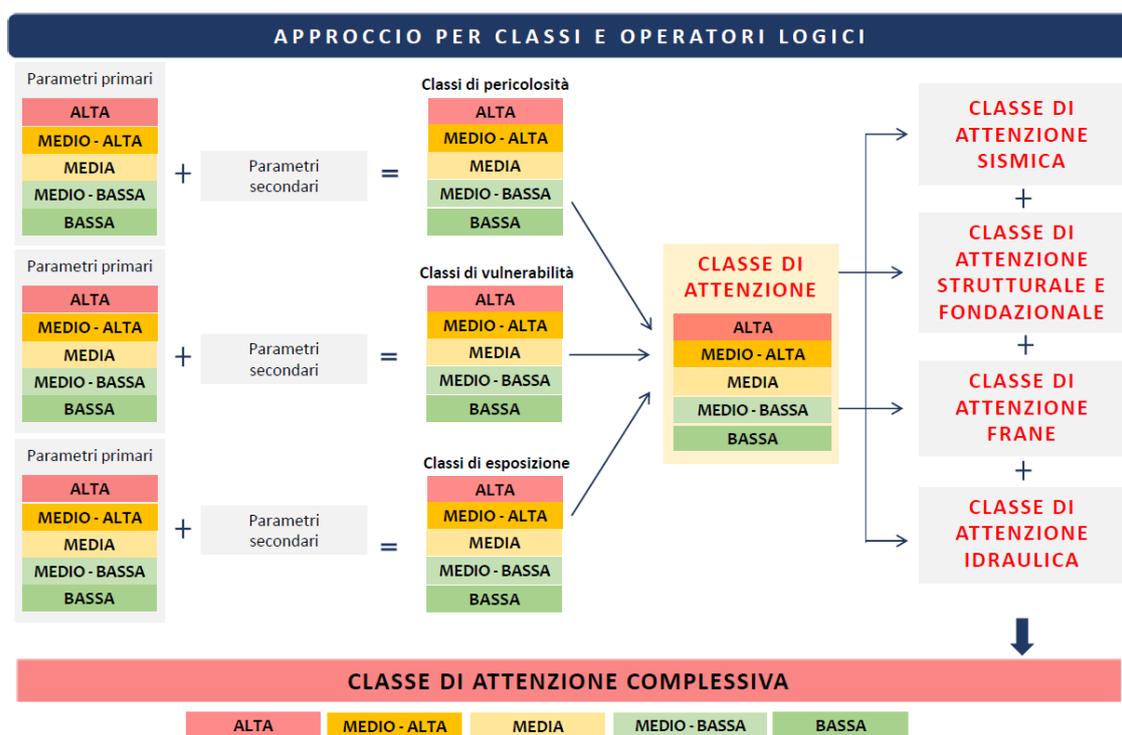


Figura 3: Flusso logico per la determinazione della classe di attenzione

Si ripete tale procedimento per le quattro tipologie di rischio individuate. Note quindi:

- Classe di attenzione strutturale e fondazionale;
- Classe di attenzione sismica;
- Classe di attenzione legata al rischio frane;
- Classe di attenzione idraulica.

Dalla combinazione di tali classi si ottiene la “Classe di Attenzione complessiva” del ponte, visibile in Figura 3. Questa identifica l’esigenza di procedere con valutazioni approfondite come ispezioni straordinarie, attività di monitoraggio e valutazioni preliminari o accurate della

sicurezza, oppure se sono sufficienti ispezioni periodiche e interventi manutentivi semplici da operare sul ponte.

Il “Livello 3” definisce le “Valutazioni Preliminari” di sicurezza da applicare nel caso di opere con classe di attenzione “Medio-Alta”, confrontando le norme vigenti all’epoca di progettazione e costruzione con le normative attualmente vigenti.

Il “Livello 4” dedica spazio alle valutazioni accurate della sicurezza previste in attuazione delle vigenti “Norme Tecniche per le Costruzioni” (Capitolo 8 delle medesime) per i ponti con classe di attenzione “Alta”. È necessaria la conoscenza del processo di verifica delle opere esistenti, operato con approcci iterativi che mediante campagne conoscitive future, possa consentire di ottimizzare le risorse economiche e rilevare le criticità presenti sull’opera. Il processo di valutazione è stato ottimizzato con l’introduzione dei “Livelli di Valutazione” sottoelencati:

- Completa adeguatezza: verifica del livello di sicurezza strutturale, sismica e idrogeologica;
- Operatività: verifica del livello di sicurezza strutturale per le azioni previste dalle NTC con tempo di riferimento di 30 anni;
- Transitabilità pesante: verifica del livello di sicurezza per le azioni previste dalle NTC con tempo di riferimento di cinque anni, nonché restrizioni sull’uso del ponte;
- Transitabilità media-leggera-autoveicoli: verifica del livello di sicurezza con schemi di carico coerenti con i mezzi previsti dal “Codice della Strada”, con restrizioni all’uso del ponte e tempo di riferimento di cinque anni.

Per ogni livello sopra definito sono state definite le azioni da traffico da considerare, i fattori parziali di sicurezza e le caratteristiche dei materiali.

Un quadro complessivo di gestione informatica delle opere, quale il “Building Information Model” (BIM), permette di rendere efficienti le fasi di classificazione, di ispezione e di monitoraggio integrando dati provenienti da più fonti.

I modelli informativi BIM, sulla base di rilievi, prove metriche e monitoraggi effettuati permettono la formazione dell’“Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche” (AINOP).

Il “Livello 5” dell’approccio multilivello è dedicato all’attività di sorveglianza e monitoraggio dei ponti previsto per le diverse classi di attenzione. L’approfondimento di tale tematica è presente nel prossimo capitolo.

Le Linee Guida, pur essendo un metodo innovativo per la gestione dei ponti, presentano una criticità nella formazione delle classi. In casi di incertezza nella decisione della “Classe di Attenzione” o di mancanza di dati per definire i parametri primari e secondari, a favore di sicurezza, viene scelta una classe di rischio maggiore. Questo approccio di tipo cautelativo può

non rappresentare la condizione del ponte oggetto di analisi, rischiando di operare dei provvedimenti di limitazione del traffico potenzialmente non necessari. Variando la tipologia di approccio, rendendola più elastica ed approfondita, si ridurrebbero le limitazioni non necessarie sulle opere. Chiaramente questo implicherebbe l'abbassamento degli standard di valutazione, non accettabile per quanto riguarda la sicurezza dei ponti e del traffico veicolare.

#### **4.1.1. Sorveglianza e monitoraggio dei ponti e viadotti stradali**

Come già riferito nei precedenti capitoli, le ispezioni periodiche e il monitoraggio dell'opera esistente permettono la continua valutazione dello stato di fatto dell'opera stessa, atto alla riduzione delle incertezze di natura conoscitiva (azioni, resistenze, modelli), ad aggiornare la valutazione del rischio e all'inserimento dell'opera stessa nelle "Classi di Attenzione" per la pianificazione degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Gli strumenti operativi atti a garantire quanto appena descritto verranno di seguito trattati con riferimento al Capitolo 7 delle "Linee Guida per i Ponti Esistenti". In particolare, si distinguono:

a. Ispezioni periodiche ordinarie e straordinarie:

Le tipologie di ispezione attuabili sui ponti secondo le Linee Guida sono trattate nel Capitolo 3.1.1 con riferimento all'Italia.

b. Indagini non distruttive e semidistruttive:

Lo scopo delle prove è di confrontare i valori numerici di spostamento e deformazione ottenuti dalle misure con i risultati di modelli numerici e di aggiornare i parametri di tali modelli ai risultati delle prove per renderli veritieri rispetto al comportamento reale della struttura in esame.

Le prove di carico possono essere eseguite come quanto indicato dalle NTC al Capitolo 9 relativamente al collaudo delle opere specificando che:

- Il carico di prova deve essere rapportato al carico di progetto effettivo che grava sul ponte;
- La risposta della struttura viene confrontata con modelli che tengono conto del degrado e delle variazioni di condizioni atmosferiche e di temperatura durante la prova;
- Il carico di prova può essere variato da quanto previsto dalle NTC nel caso in cui venga preliminarmente dimostrata la capacità della struttura a sopportarlo con margine di sicurezza.

Il carico di prova deve essere applicato gradualmente con cicli di carico-scarico e mantenuto in ogni situazione di carico per un tempo che consenta una lettura stabile dei valori forniti dagli strumenti di misura. In caso di lesioni della superficie o delle parti strutturali e comportamenti anomali la prova viene interrotta e avviate indagini di dettaglio. Gli spostamenti residui devono essere inferiori al 5% dei valori massimi.

I rilievi della risposta dinamica vengono effettuati con sensori di velocità, accelerazione, deformazione e spostamento alle vibrazioni ambientali e al transito di veicoli. Spesso accompagnate alle prove di carico statiche, impiegano stazioni GPS e la vibrometria laser. La determinazione delle proprietà dinamiche sperimentali della struttura può essere condotta con tecniche “Operational Modal Analysis” (OMA) o con sistemi “Weigh-in-Motion” (WIM) abbinati a telecamere.

c. Monitoraggio strumentale:

Le tecniche di monitoraggio strumentale “Structural Health Monitoring” (SHM) consistono nell’installazione per periodi di tempo limitati o per l’intera vita della struttura di reti di sensori per l’acquisizione dei dati, elaborati in modo semiautomatico o automatico dalle componenti hardware e software. L’interesse è di identificare gli stati di danno strutturale o malfunzionamenti delle dotazioni ausiliarie in modo precoce e più affidabile rispetto alle operazioni classiche di sorveglianza visiva, con una tempestiva segnalazione di questi stati. In particolare, si riconoscono due tipologie di monitoraggio:

- Monitoraggio occasionale e periodico: Prevede l’installazione di un sistema SHM per un periodo di tempo limitato con possibile ripetizione dell’installazione e intervalli regolari di tempo. È raccomandato in caso di interventi di manutenzione straordinaria, di studio dei versanti, dei fenomeni di degrado e dei danneggiamenti anomali, oltre che in caso di classi di rischio elevato (CdA “Alta” e “Medio-Alta”).

Tale metodo è efficace su stati che interessano l’opera già osservati in precedenza. I sensori impiegati acquisiscono e trasmettono i dati con modalità cablata o wireless. Sono comuni gli apparecchi topografici robotizzati e le tecnologie laser e radar per la misura degli spostamenti. I rapporti contenenti l’analisi dei dati sono registrati nel BMS di competenza;

- Monitoraggio permanente o continuo: Il sistema hardware e software opera per lunghi periodi sino a coprire la vita di servizio della struttura. È raccomandato in caso di ponti strallati o sospesi, ponti con luce maggiore di 200 metri, ponti con campate di luce superiore ai 50 metri in c.a.p. realizzati da più di 40 anni, ponti di rilevanza storica o con difficoltà di ispezione, ponti in ambienti critici.

Vengono segnalati i possibili problemi di durabilità, robustezza e manutenibilità dei sensori e delle apparecchiature. Tutti i rapporti risultanti delle analisi dei dati verranno registrati nel BMS di competenza per la determinazione della CdA;

Nel dettaglio si riportano le applicazioni di monitoraggio più comuni:

- Monitoraggio strutturale: Si impiegano stazioni meteorologiche, sistemi “WIM”, sensori per il controllo della corrosione, sensori di spostamento, deformazione, accelerazione,

temperatura e umidità relativa, sensori di irraggiamento e per il controllo dello scalzamento delle pile;

- Monitoraggio sismico: Per i ponti in zona sismica oggetto di monitoraggio continuo vengono installati accelerometri per il rilevamento del moto al suolo in corrispondenza delle spalle e in almeno una posizione lontana dal ponte;
- Monitoraggio geotecnico: Per il monitoraggio continuo dei movimenti delle fondazioni delle pile, delle spalle e dei terreni interessati;
- Monitoraggio idraulico: Per i ponti a rischio idraulico sono previste misurazioni della velocità, della portata e del livello idrico del corso d'acqua con segnalazione automatica in caso di risultati eccedenti a quelli di riferimento e stazioni meteorologiche;
- Monitoraggio dei versanti naturali e artificiali coinvolgenti ponti: Per i ponti soggetti al rischio di frana dei versanti si monitorano le zone in frana che possono coinvolgere il ponte con segnalazioni automatiche.

d. Indicatori numerici e modelli di degrado:

La trattazione sulla quantificazione del degrado e la relativa programmazione degli interventi viene trattata nel Capitolo 5.3. con dettaglio alle Linee Guida.

#### **4.1.2. Impatto della pavimentazione stradale sulla valutazione**

Nella valutazione del degrado del ponte o viadotto stradale è concorrente anche la pavimentazione stradale che compone l'opera. Essa, infatti, risulta essere la prima parte dell'opera a contatto con il traffico veicolare e quindi con chi usufruisce del bene. I difetti presenti sono identificati nelle "Schede di Valutazione dei Difetti", con apposite schede dedicate. I difetti non incidono sullo stato di salute strutturale del ponte ma bensì sugli oneri complessivi degli interventi di manutenzione da sostenere sull'opera. Si riporta in Figura 4 la scheda specifica di ispezione dell'opera.

In particolare, si valutano:

- Stato della pavimentazione: Se interessato da dislivelli, dossi e fessure;
- Presenza o assenza dei cordoli;
- Convogliamento delle acque: Presenza di problematiche come intasamento dei pozzetti, scarichi corti, ostruiti o danneggiati;
- Marciapiedi: Se sono presenti e in che stato di fatto è la pavimentazione, con possibile l'approfondimento in tre casi diversi:
  - a. Marciapiede assente;
  - b. Marciapiede sormontabile;

c. Marciapiede non sormontabile.

Per il primo caso si analizza in dettaglio il guardiavia, ovvero la barriera di sicurezza stradale, definendone la tipologia e lo stato di danneggiamento. Per i due rimanenti casi si analizzano anche i parapetti, allegando opportuna documentazione fotografica ad ogni caso trattato come visibile in Figura 5, con apposita scheda.

- Pali di illuminazione: Danneggiamento e presenza di tali elementi;
- Sottoservizi: Presenza o no di tali.

**Scheda Ispezione Ponti di Livello 1**

**20** Elementi accessori (indicare solamente se il difetto è presente)

Strada di appartenenza: \_\_\_\_\_ Progressiva km: \_\_\_\_\_ Tecnico rilevatore: \_\_\_\_\_ Data: / /

N° corsie \_\_\_\_\_

Larghezza carreggiata \_\_\_\_\_

Marciapiede  SI  NO

1 (solo su un lato) 2 (su entrambi i lati)

Larghezza marciapiede \_\_\_\_\_

Altezza marciapiede \_\_\_\_\_

BARRIERE LATERALI		
<input type="checkbox"/>	CASO 1	Marciapiede assente
<input type="checkbox"/>	CASO 2	Marciapiede sormontabile
<input type="checkbox"/>	CASO 3	Marciapiede non sormontabile

Elemento ispezionato	N°	Descrizione difetto	N° foto	Note	
Stato della pavimentazione	El.Acc_1	Dislivello rilevato impalcato	<input type="checkbox"/>		
		Presenza di dossi	<input type="checkbox"/>		
		Fessure - anomalie	<input type="checkbox"/>		
Cordoli	El.Acc_2	Assenti	<input type="checkbox"/>		
		Degradati	<input type="checkbox"/>		
Convogliamento acque	El.Acc_3	Assenti	<input type="checkbox"/>		
		Pozzetti intasati	<input type="checkbox"/>		
		El.Acc_4	Scarichi corti	<input type="checkbox"/>	
		El.Acc_5	Scarichi ostruiti	<input type="checkbox"/>	
		El.Acc_6	Scarichi danneggiati	<input type="checkbox"/>	
Marciapiedi	El.Acc_7	Assenti	<input type="checkbox"/>		
		Cattiva pavimentazione	<input type="checkbox"/>		
Pali di illuminazione	El.Acc_8	Assenti	<input type="checkbox"/>		
		Mal ancorati	<input type="checkbox"/>		
		Danneggiati	<input type="checkbox"/>		
Sottoservizi	El.Acc_9	El.Acc_10	Arrugginiti	<input type="checkbox"/>	
		El.Acc_11	Assenti	<input type="checkbox"/>	
		Mal ancorati	<input type="checkbox"/>		

Figura 4: Scheda di Ispezione Ponti contenuta nelle Schede di Valutazione dei Difetti

Caso 3		Marciapiede NON sormontabile		N° foto
1	GUARDIAVIA	Assente	<input type="checkbox"/>	
		Presente	<input type="checkbox"/> Come guardiavia <input type="checkbox"/> Come parapetto	
		Tipologia	<input type="checkbox"/> Muratura	
			<input type="checkbox"/> Ringhiera	
			<input type="checkbox"/> Metallico	
		<input type="checkbox"/> Altro		
		Danneggiati	<input type="checkbox"/> Lievemente	
			<input type="checkbox"/> Gravemente	
		Ossidati	<input type="checkbox"/> Lievemente	
			<input type="checkbox"/> Gravemente	
		Altezza (cm)	<input type="checkbox"/>	
		Mal ancorati	<input type="checkbox"/>	
Elementi di ancoraggio	<input type="checkbox"/> Danneggiati <input type="checkbox"/> Ossidati			
Assente (se guardiavia non necessario)		<input type="checkbox"/>		
2	PARAPETTO (Guardiavia se 1 assente)	<input type="checkbox"/> Muratura		
		<input type="checkbox"/> Ringhiera		
		<input type="checkbox"/> Metallico		
		<input type="checkbox"/> Altro		
		Danneggiati	<input type="checkbox"/> Lievemente	
			<input type="checkbox"/> Gravemente	
		Ossidati	<input type="checkbox"/> Lievemente	
			<input type="checkbox"/> Gravemente	
		Mal ancorati	<input type="checkbox"/>	
		Elementi di ancoraggio	<input type="checkbox"/> Danneggiati <input type="checkbox"/> Ossidati	
		Altezza (cm)	<input type="checkbox"/>	

Figura 5: Approfondimento della tipologia di marciapiede con apposita Scheda di Ispezione dei Ponti, specifica per il caso di marciapiede non sormontabile

Come già specificato in precedenza, ogni difetto possiede un peso ( $G$ ) variabile che meglio ne descrive la gravità sull'elemento trattato. In Tabella 3 si riportano i pesi di ogni difetto riscontrabile nella pavimentazione stradale presenti nelle “Schede Difettologiche”.

*Tabella 3: Difetti presenti sulla pavimentazione stradale*

<b>Tipo di difetto</b>	<b>N° difetto</b>	<b>Peso <math>G</math></b>
Stato della pavimentazione	El. Acc._1	1
Cordoli	El. Acc._2	1
Convogliamento acque assente	El. Acc._3	3
Pozzetti intasati	El. Acc._4	1
Scarichi corti	El. Acc._5	2
Scarichi ostruiti	El. Acc._6	1
Scarichi danneggiati	El. Acc._7	2
Marciapiedi	El. Acc._8	1
Pali di illuminazione mal ancorati/danneggiati	El. Acc._9	2
Pali di illuminazione arrugginiti	El. Acc._10	1
Sottoservizi mal ancorati	El. Acc._11	2
Guardiavia assenti	El. Acc._12	4
Guardiavia danneggiati/ossidati/male ancorati	El. Acc._13	2
G variabile da 1 a 5, con valori crescenti per gravità del difetto.		

È possibile notare che quasi tutti i difetti hanno peso  $G$  pari ad 1 o 2, considerabili quindi con gravità bassa o medio-bassa. Sono tuttavia presenti due difetti, ovvero il convogliamento delle acque assente e i guardiavia assenti, con peso “3” e “4”, quindi di livello medio e medio-alto che possono interessare l’opera e ridurre la sicurezza durante la circolazione dei mezzi. Si riporta in Figura 6 a pagina seguente un esempio di “Scheda Difettologica”, specifica per lo “Stato della pavimentazione”. Per una migliore identificazione del difetto, viene riportata la descrizione del medesimo, le cause che concorrono alla sua formazione e i fenomeni di degrado correlati.

Stato della pavimentazione				
Peso del difetto				
G = 1	G = 2	G = 3	G = 4	G = 5
<p><b>Descrizione</b></p> <p>Nell'ispezione della pavimentazione stradale, si dovranno segnalare, se presenti, i seguenti difetti:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dislivello tra rilevato e impalcato: esso può essere localizzato su entrambe le spalle o su una sola di esse e va segnalato se la differenza di quota tra il rilevato e l'impalcato supera i 2 cm;</li> <li>- Presenza di dossi: si riferisce alla presenza di avvallamenti o ondulazioni sulla superficie stradale superiori ai 15 mm;</li> <li>- Fessure/anomalie della pavimentazione: sono spesso presenti in corrispondenza degli elementi di continuità dei giunti e sono riconducibili ai normali fenomeni di ritiro del materiale costituente la pavimentazione.</li> </ul>				
<p><b>Cause</b></p> <p>I dislivelli presenti sulla pavimentazione possono essere dovuti a cattiva esecuzione della pavimentazione, compattazione del terreno sottostante, cedimenti anomali delle fondazioni. I dossi, invece, sono causati dalla compattazione del materiale di cui è composto lo stato di usura, dalla ricostruzione del manto dopo scavi per l'interro di tubazioni, della presenza di tombini o dossi artificiali. Le fessure sono dovute principalmente agli effetti del ritiro della pavimentazione e amplificate dal passaggio di traffico pesante.</p>				
<p><b>Fenomeni di degrado correlati</b></p> <p>Difetti della pavimentazione sono spesso associati a difetti sugli eventuali giunti presenti. Talvolta sono sintomi di movimenti anomali di fondazione o difetti in corrispondenza degli elementi di appoggio.</p>				



Figura 6: Esempio di Scheda Difettologica per lo stato della pavimentazione

La valutazione della pavimentazione stradale ricopre un ruolo marginale nell'analisi offerta dalle Linee Guida. I pesi dei difetti sono quasi per la totalità di classe bassa nonostante gli ammaloramenti come buche e fessurazioni, se trascurati, possano risultare pericolosi direttamente all'utenza che usufruisce dell'opera.

In particolare, viene a mancare una valutazione prestazionale della pavimentazione stradale ottenibile con analisi di tipo strumentale e prove distruttive e non. Non vi sono quindi dei riferimenti puramente numerici che permettano di classificare e confrontare i difetti presenti.

Non vengono considerati inoltre i moderni accorgimenti in termini di materiali e di tecniche costruttive, soprattutto tra l'impalcato e la pavimentazione stradale, che contribuiscono a salvaguardare il ponte.

## 4.2. Linee Guida per i Ponti Ferroviari Esistenti

L'ANSFISA, RFI e il Consorzio Fabre sono attualmente coinvolti nello svolgimento delle operazioni previste dalla bozza delle "Linee Guida per il censimento, la classificazione e la gestione dei ponti ferroviari esistenti" su ben 15 ponti ferroviari.

Come le analoghe “Linee Guida per i Ponti esistenti”, questo provvedimento si configura come uno strumento avanzato che consentirà, oltre al censimento delle opere esistenti, la determinazione di una classe di attenzione per la gestione del rischio, la verifica di sicurezza dei ponti ferroviari e la relativa programmazione degli interventi.

#### **4.2.1. Sorveglianza e monitoraggio dei ponti e viadotti ferroviari**

Come quanto specificato nei paragrafi precedenti, le Linee Guida riguardanti i ponti ferroviari sono attualmente di natura provvisoria, si farà quindi riferimento a quanto espresso dall’ente “Rete Ferroviaria Italiana” (RFI) per le fasi di sorveglianza e monitoraggio delle opere.

Il sistema di monitoraggio dei ponti e viadotti esistenti in ambito ferroviario è paragonabile a quello delle infrastrutture stradali sopra descritto. La strategia di azione prevede l'accostamento delle ispezioni visive in caso di eventi eccezionali, identificato a sisma, a sistemi di monitoraggio strumentale in caso di caratteristiche strutturali e stati di fatto particolari.

I sistemi di monitoraggio quali i sensori di deformazione, gli accelerometri e gli inclinometri permettono l'identificazione delle grandezze dinamiche per individuare gli ammaloramenti presenti nei ponti ferroviari tramite prove sperimentali, la modellazione in ambito “FEM” del comportamento reale della struttura e l'analisi critica dei risultati.

Il monitoraggio continuo dei ponti permette di confrontare i parametri misurati come deformazioni, rotazioni, spostamenti e stati tensionali con valori limite detti “Livelli di Soglia” definiti come:

- Soglia di Allerta: I parametri monitorati rientrano nei limiti di sicurezza;
- Soglia di Allarme: I parametri monitorati superano i limiti di sicurezza e indicano un danneggiamento dell'opera.

In relazione ai risultati ottenuti si definiscono le azioni sui ponti, quali l'aumento della frequenza delle ispezioni, limitazioni di carico e di velocità.

È possibile implementare un sistema di "Early Warning Sismico" che sfrutta le stazioni accelerometriche di RFI installate lungo la linea ferroviaria per stimare l'intensità del sisma che sta interessando l'area a partire dal suo epicentro in modo da avviare la frenatura di emergenza dei treni prima che lo scuotimento li raggiunga. Tali sistemi sono presenti in Giappone, California, Messico e Cina. In Italia è stato sperimentato nella tratta Roma-Napoli ad alta velocità tra il 2018 e il 2020 con la cooperazione internazionale tra RFI, il “Research Institute Railway Technical” e l'Università degli Studi di Napoli Federico II.



# Capitolo 5: Metodi di quantificazione del degrado nelle strutture

Qualunque sia il metodo ispettivo, non sempre i difetti potenzialmente dannosi per la capacità portante della struttura possono essere individuati, come i casi di corrosione puntuale, riduzione dello stato tensionale dei cavi di post o precompressione.

L'ispezione, quindi, non garantirà al cento per cento la scoperta dell'insorgere di un fenomeno quale un collasso o cedimento, ma sarà in grado di ridurre la possibilità di avvenimento.

Nel seguente capitolo sono analizzati i principali metodi per la quantificazione e valutazione del danno nei ponti esistenti. Si porrà particolare attenzione sulla definizione della priorità di intervento dell'opera, atta a garantire una risposta concreta e tempestiva al contenimento del degrado. Tutte le metodologie trattate saranno inoltre oggetto di confronto per evidenziarne i relativi vantaggi e svantaggi.

## 5.1. Metodo del CIAS

Questa procedura ispettiva è descritta nel “Manuale per la Valutazione dello Stato dei Ponti”, rilasciato dal “Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale di Bolzano” (CIAS) nel 2011 ed è denominata Metodo di Valutazione Numerica, ovvero “Metodo MVN”.

### 5.1.1. Valutazione del Degrado secondo il Metodo del CIAS

Grazie alla ripetibilità delle procedure di ispezione, tale metodo permette il confronto nel tempo dello stato dell'opera grazie alla compilazione di “Schede di Valutazione” che forniscono, sulla base dei risultati del MVN, un valore numerico finale correlato allo stato complessivo del degrado. Più alto sarà questo valore e più grave sarà la condizione generale del manufatto.

La valutazione numerica prevede la sommatoria dei pesi ( $G$ ) attribuiti ai singoli difetti, moltiplicati per i coefficienti di “Estensione” ( $K_1$ ) ed “Intensità” ( $K_2$ ), definendo così la “Difettosità Relativa” ( $DR$ ) e la “Difettosità Assoluta” ( $DA$ ).

Si definisce “Difettosità Relativa” il valore finale della valutazione eseguita per ogni singolo elemento strutturale e rappresenta l'indice dello stato di degrado.

$$DR = \sum ( G \times K_1 \times K_2 )$$

Si definisce “Difettosità Assoluta” il valore derivante dalla sommatoria dei difetti moltiplicati per il numero ( $N$ ) dei singoli elementi strutturali considerati.  $DA$  rappresenta l’indice complessivo del degrado e indica la dimensione dell’onere economico da sostenere per il risanamento del manufatto.

$$DA = \sum ( N \times G \times K1 \times K2 )$$

La valutazione numerica e l’analisi critica dei risultati permettono di programmare interventi mirati all’eliminazione delle cause di degrado per i casi meno gravi. Nei casi più complessi che possono interessare il rischio strutturale sarà opportuno eseguire indagini sperimentali e verifiche teoriche per individuare le origini e le conseguenze dei fenomeni individuati.

I possibili difetti presenti sulla struttura sono codificati in apposite “Schede Difettologiche”, con indicati i relativi valori di  $G$ ,  $K_1$  e  $K_2$ , la causa e la descrizione del difetto, immagine di riferimento, correlazione con altri difetti, eventuali interventi e indagini da eseguire.

In Figura 7 è riportato un esempio di “Scheda Difettologica”. Il valore di  $G$  varia da 1 a 5 e deriva dal peso che il difetto assume rispetto alla gravità derivante da:

- Costituire un pericolo (rischio attuale);
- Possibilità di ridurre le capacità portanti (rischio potenziale);
- Costituire un innesco di altri difetti (rischio indotto);
- Alto onere economico per il ripristino (rischio economico).

<b>CLS DILAVATO / AMMALORATO</b>						<b>1.3</b>
<b>G</b>	<i>Estensione <math>K_1</math></i>			<i>Intensità <math>K_2</math></i>		
	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>1</i>
<b>2</b>	<i>Appena presente</i>	<i>~ 50% della superficie</i>	<i>~ tutta la superficie</i>	<i>Sempre = 1</i>		

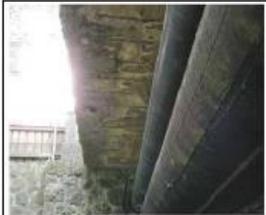
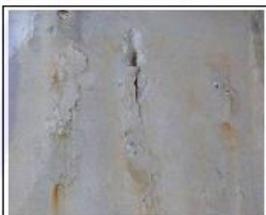




Figura 7: Esempio di porzione di Scheda Difettologica del cls dilavato e ammalorato

I coefficienti  $K_1$  e  $K_2$  del difetto possono assumere un valore tra 0.2, 0.5 e 1.0, relativamente all'estensione e all'intensità sull'elemento strutturale. Con il valore unitario si considerano i difetti che interessano l'intera superficie dell'elemento. Durante l'ispezione, con sistematicità e precisione, i difetti sono riportati nelle "Schede di Valutazione Ispettiva" che a loro volta verranno inserite nel sistema informatico che effettuerà il calcolo di  $DR$  e  $DA$ .

Le schede sono predisposte per gli elementi del ponte come spalle, pile, giunti, piedritti, archi, travi e traversi e suddivise secondo il materiale di costruzione; calcestruzzo, muratura, acciaio e legno. Ogni scheda contiene tutti i difetti riscontrabili sull'elemento strutturale per il materiale specificato. Si riporta in Figura 8 un esempio di Scheda di Valutazione.

Scheda Ispezione Ponti						Nome amministrazione			LOGO		
3 Pile		N° _____		Posizione _____		Materiale: calcestruzzo					
Struttura: _____		Località: _____		km: _____		Ispettore: _____		data: / / _____			
N°	Descrizione difetto	Vetro	G	Estensione $K_1$			Intensità $K_2$			N° Foto	Note
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1		
1.1)	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>							
1.2)	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							
1.3)	Cis dilavato / ammolorato	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>							
1.4)	Vespai	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>							
1.5)	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>							
1.6)	Armatura ossidata	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>							
1.13)	Lesioni a ragnatela modeste	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>							
1.14)	Fessure orizzontali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>							
1.15)	Fessure verticali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>							
1.16)	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>							
1.20)	Staffe scoperte / ossidate	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>							
1.21)	Lesioni attacco pilastri	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>							
1.23)	Armatura verticale deformata	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>							
1.25)	Riprese successive deteriorate	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>							
1.29)	Danni da urto	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							
1.30)	Danni causati dagli app. d'appog.	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							
5.1)	Fuori piombo	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>							
5.2)	Scazzamento	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>							
5.5)	Difetti d'appoggio in neoprene	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							
5.6)	Difetti pendoli	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							
5.7)	Difetti carrelli	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							
5.8)	Difetti d'appoggio compositi	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>							

Figura 8: Esempio di Scheda di Valutazione Ispettiva

### 5.1.2. Programmazione degli interventi secondo il Metodo del CIAS

Il metodo MNV permette la classificazione delle opere per gravità di degrado da parte dell'ente gestore grazie ai risultati numerici. Per effettuare una valutazione comparativa sul grado di manutenzione, è necessario determinare il valore della "Difettosità Relativa Massima" che può assumere l'opera in esame e confrontarlo con il valore di "Difettosità Relativa" della medesima. Il rapporto tra tali difettosità consente di ordinare i ponti in relazione alla gravità dei difetti. Per un rapporto con risultato maggiore di 0.25, l'ente gestore provvederà ad interventi di manutenzione.

## 5.2. Approccio Bottom-Up

Il presente approccio, redatto da Carlo Pellegrino, Mariano Angelo Zanini, Flora Faleschini, Lorenzo Mancassola, Filippo Andreose e Michele Frizzarin, è stato adottato da Concessioni Autostradali Venete (CAV) per la gestione dei propri manufatti. Questo metodo è anche detto “Metodo di Pellegrino et Al”.

### 5.2.1. Valutazione del degrado secondo l’approccio Bottom-Up

Lo strumento proposto si basa sulla fase di ispezione visiva, in particolare sulla compilazione di “Schede di Valutazione” che forniscono un giudizio oggettivo sullo stato di conservazione degli elementi strutturali dell’opera mediante l’assegnazione di un “Condition Value” (CV), che può assumere fino a sei valori come visibile nella Figura 9.

Defects	CV
No judgement	0
No meaningful defect	1
Minor defects that do not cause damage	2
Moderate defects that could cause damage	3
Severe defects that cause damage	4
Non-functional or non-existent element	5

Figura 9: Valori di CV in relazione al livello di deterioramento

Per la valutazione dell’intera struttura viene impiegato l’algoritmo del “Total Sufficiency Rating” (TSR), il quale quantifica l’efficienza complessiva della struttura. Nella Figura 10 sotto riportata si individuano ulteriori coefficienti impiegati nell’algoritmo, come l’“Element Sufficiency Rating” (ESR), il “Condition Factor” (CF), il peso (W) e il “Location Factor” (LF).

YEAR OF VISUAL INSPECTION SURVEY								2014	
Code	Elements	Condition Value (CV)	Condition Factor (CF)	Location Factor (LF)	Weight (W <sub>i</sub> )	Evaluated? (YES/NO)	Traffic Index (TI)	Age Factor (AF)	Element Sufficiency Rating (ESR)
1	Longitudinal elements	2	75	5	12	YES	1	1	38
2	Arches	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Pillars	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Piers	3	50	5	12	YES	1	1	25
5	Transversal elements	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Slabs	3	50	5	12	YES	1	1	25
7	Support equipment	0	50	6	10	NO	1	1	30
8	Seismic devices	-	-	6	-	-	-	-	-
9	Abutments	0	50	7	8	NO	1	1	35
10	Approach embankments	1	100	7	8	YES	1	1	70
11	Wing walls	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Joints	3	50	9	6	YES	1	1	45
13	Drainage system	3	50	9	6	YES	1	1	45
14	Pavement	2	75	10	4	YES	1	1	75
15	Curbs	4	25	10	4	YES	1	1	25
16	Sidewalk	-	-	10	-	-	-	-	-
17	Guardrails	-	-	10	-	-	-	-	-
18	Lighting	3	50	10	4	YES	1	1	50
19	Utilities	-	-	-	-	-	-	-	-

$\sum W_i m$ elements	68
$\sum W_i n$ elements	86

TSR <sub>REAL</sub>	43
TSR <sub>NV</sub>	36

<b>TSR</b>	<b>41</b>
------------	-----------

Figura 10: Sintesi dell’algoritmo del TSR

Nell'ottica di gestione di rete si definiscono molteplici livelli di efficienza a cui corrispondono altrettanti livelli di priorità di intervento a seconda del valore di *TSR* ottenuto, come visibile nella Tabella 3.

Tabella 4: Definizione delle fasce di efficienza in relazione al coefficiente *TSR*

Fascia di efficienza	Valore di <i>TSR</i>
Massima urgenza	Tra 1 e 25
Intervento a breve termine	Tra 26 e 50
Intervento a medio termine	Tra 51 e 75
Intervento a lungo termine	Tra 76 e 100

### 5.2.2. Programmazione degli interventi secondo l'approccio Bottom-Up

Come visibile nella Figura 10, dal *CV* è possibile ricavare l'indice *ESR* che consente di definire la priorità di intervento del manufatto oggetto di indagine e pianificarne la manutenzione in due livelli diversi:

- Project Level: Il "Location Factor" definisce l'importanza degli elementi che costituiscono il ponte, è conferita priorità agli elementi strutturali;
- Network Level: Si considera l'importanza strategica del ponte all'interno della rete viaria tramite il "Network Bridge Importance" (*NBI*), il "Road Type" (*RT*), il "Traffic Index" (*TI*) e l'"Age Factor" (*AF*).

Il livello di priorità di intervento riguardante il singolo elemento del ponte è determinato dal valore del coefficiente *ESR*. Tale per cui i livelli di urgenza sono visibili nella Tabella 5.

$$ESR = CF \times LF \times RT \times TI \times NBI \times AF$$

Tabella 5: Livelli di urgenza di intervento per i singoli elementi secondo *ESR*

Livelli di urgenza	Valore di <i>ESR</i>
Massima urgenza	Tra 1 e 10
Intervento a breve termine	Tra 11 e 20
Intervento a medio termine	Tra 21 e 30
Intervento a lungo termine	Tra 31 e 100

Come già definito, l'indice *TSR* fornisce una valutazione complessiva della struttura, ottenibile con la seguente relazione:

$$TSR = \left( \frac{100 \text{ } TSR_{real} + \text{ } TSR_{min} \text{ } CoF}{100 + CoF} \right)$$

Dove “*TSR<sub>real</sub>*” e “*TSR<sub>min</sub>*” sono i valori di *TSR* nella situazione reale e peggiore possibile. Il coefficiente “*CoF*” è il “Fattore di Confidenza” che tiene conto degli elementi non valutati. Nella Tabella 6 sono visibili i livelli di urgenza in relazione al valore di *TSR*.

*Tabella 6: Livelli di urgenza di intervento per l'intera struttura secondo*

<b>Livelli di urgenza</b>	<b>Valore di TSR</b>
Massima urgenza	Tra 1 e 30
Intervento a breve termine	Tra 31 e 40
Intervento a medio termine	Tra 41 e 60
Intervento a lungo termine	Tra 61 e 100

La particolarità di questo metodo è che, oltre ad individuare i ponti più critici della rete mediante il *TSR*, suggerisce gli interventi da eseguire sui medesimi in base al valore di *ESR* dei singoli elementi costituenti.

### **5.3. Metodo secondo le Linee Guida per i Ponti Esistenti**

Tale metodologia di valutazione del danno è in parte equivalente al metodo proposto dal CIAS. Vedasi il Capitolo 4.1. per la trattazione di dettaglio delle Linee Guida.

#### **5.3.1. Valutazione del degrado secondo le Linee Guida**

Lo stato di condizione di ogni elemento che costituisce il ponte è definito dalla “Difettosità Relativa” (*DR*) espressa di seguito, dato dalla combinazione dei parametri “Gravità” (*G*), “Intensità” (*K<sub>1</sub>*) ed “Estensione” (*K<sub>2</sub>*) riguardanti i difetti rilevati.

$$DR = \sum ( G \times K1 \times K2)$$

Per una più efficace pianificazione degli interventi, il valore *DR* può essere definito su gruppi omogenei di un dato elemento o sull'intero ponte mediante somme pesate dei *DR* dei singoli elementi costituenti. La definizione di questo parametro inoltre richiede la compilazione di "Schede di Valutazione dei Difetti", un'evoluzione delle schede analoghe fornite dal CIAS. Le schede vengono compilate sulla base di valutazioni soggettive compiute dall'ispettore.

Le Linee Guida non forniscono un metodo per determinare in modo esplicito lo stato di degrado della struttura, conferendo all'ente gestore il compito di eseguire proprie analisi.

### 5.3.2. Programmazione degli interventi secondo le Linee Guida

La programmazione degli interventi è subordinata alla definizione delle "Classi di Attenzione" (*CdA*) del ponte. Le "Schede di Difettosità", impiegate per definire l'indice di condizione del ponte, definiscono il "Livello di Difettosità" legato allo stato di salute dell'opera. Come visibile in Figura 11, tale parametro si suddivide in cinque classi in funzione della gravità, dell'intensità e dell'estensione dei difetti rilevati sull'elemento strutturale.

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

Figura 11: Livello di Difettosità previsto dalle Linee Guida per i Ponti Esistenti

La combinazione di questo parametro con ulteriori classi tramite flussi e operatori logici permette la definizione della *CdA* complessiva del ponte, che assume i valori visibili in Figura 12. Per la definizione di tale classe vengono considerati i comportamenti strutturali dell'opera, la risposta alle azioni sismiche e franose ed eventuale presenza di corsi d'acqua. La *CdA* consente di definire una programmazione degli investimenti e degli interventi di manutenzione necessari nei due livelli di pianificazione:

- Per il Network Level: Il Livello 5 delle Linee Guida classifica i ponti rilevanti in termini strategici;

- Per il Project Level: Vengono definite le azioni da sostenere sulla singola opera in relazione alla *CdA* ottenuta, come valutazioni accurate della sicurezza, installazione di sistemi di monitoraggio e ispezioni straordinarie.

**CLASSE DI ATTENZIONE**



*Figura 12: Valori assunti dalla CdA complessiva del ponte*

## 5.4. Metodo secondo gli Stati Uniti d’America

Le fasi di valutazione del degrado e la relativa pianificazione degli interventi sono definiti dal Manuale “AASHTO Manual for Bridge Evaluation”.

### 5.4.1. Valutazione del degrado secondo gli Stati Uniti d’America

La valutazione dello stato di salute del ponte è centrata sulla definizione di:

- Components: Impalcato, sovrastruttura e sottostruttura del ponte;
- Elements: Singoli elementi che formano i “Components”.

L’ispettore ha la mansione di assegnare a queste due macrocategorie ispezionate un valore numerico variabile da 0 a 9, come visibile nella Tabella 7.

*Tabella 7: Sistema di valutazione dei Components*

Rating	Description		
N	Not Applicable.	3	Serious Condition – loss of section, deterioration, spalling or scour have seriously affected primary structural elements.
9	Excellent Condition.		
8	Very good Condition – no problems discovered.		Critical Condition – advanced deterioration of primary structural elements.
7	Good Condition – some minor problems.	2	
6	Satisfactory Condition – structural elements show some minor deterioration.	1	Imminent Failure Condition – major deterioration or section loss present in critical structural components, or obvious vertical or horizontal movement affecting structure stability.
5	Fair Condition – all primary structural elements are sound but may have minor section loss, cracking, spalling, or scour.		
4	Poor Condition – advanced section loss, deterioration, spalling, or scour.	0	Failed condition – out of service.

La valutazione risente della capacità dell’ispettore di identificare i componenti del ponte e i relativi elementi che li formano. Tale metodo non considera direttamente la severità e l’estensione

dei difetti riscontrati. In caso di rilevamento di situazioni critiche, il regolamento definito dalla FHWA definisce le operazioni di valutazione e intervento da intraprendere sulla struttura. Queste prevedono l'assegnazione di un coefficiente di valore minore nel caso di difetti che possano compromettere la capacità strutturale del "Components" osservato. Nel caso di interventi di miglioria sul componente, la valutazione deve essere aggiornata in positivo. Inoltre, l'ispettore assegna ad ogni elemento del ponte che forma i "Components" una valutazione descrittiva delle condizioni di fatto, come visibile in Tabella 8. Vengono specificati tutti i deterioramenti presenti sugli elementi di ogni componente, in termini di posizione, dimensione, quantità e severità.

*Tabella 8: Valutazione descrittiva delle condizioni degli Elements.*

Condition	Description
Good	Element is limited to only minor problems.
Fair	Structural capacity of element is not affected by minor deterioration, spalling, cracking etc.
Poor	Structural capacity of element is affected by advanced deterioration, section loss, spalling, cracking or other deficiency.

Per strutture localizzate su corsi d'acqua, la FHWA prevede ulteriori valutazioni riguardanti il canale e le opere di protezione con coefficienti numerici visibili nella Tabella 9 a pagina seguente. Si ricercano condizioni di erosione degli argini, sedimentazione sulla sottostruttura e sovrastruttura.

Infine, il ponte viene valutato in relazione al livello di servizio che fornisce nel sistema autostradale definendo sette parametri e gli "Appraisal Ratings". L'impalcato, la sovrastruttura, la sottostruttura e le opere di protezione formano il "Condition Rating".

Nel dettaglio:

- Structural Evaluation: Valutazione complessiva dell'opera basata sull'indice di condizione minore tra gli elementi che lo compongono;
- Deck Geometry: Distanza tra i parapetti nella sezione trasversale del ponte e la luce minima verticale sopra l'impalcato;
- Under-clearances: Luce verticale tra l'intradosso e la strada sotto il ponte;
- Waterway Adequacy: Adeguatezza dell'apertura sotto il ponte per il corso d'acqua;
- Approach Roadway Alignment: Allineamento delle estremità del ponte con l'infrastruttura viaria di cui fa parte;
- Traffic Safety Features: Adeguatezza delle barriere di protezione sul ponte;
- Scour Critical Bridges; Condizioni del ponte sulla rimozione di sedimenti in prossimità di spalle e pilastri del ponte.

I parametri sopra citati sono funzioni dei dati di ispezione del ponte e derivanti da analisi pregresse.

*Tabella 9: Valutazione delle condizioni del canale e delle opere di protezione.*

<u>Code</u>	<u>Description</u>
N	Not applicable. Use when bridge is not over a waterway (channel).
9	There are no noticeable or noteworthy deficiencies which affect the condition of the channel.
8	Banks are protected or well vegetated. River control devices such as spur dikes and embankment protection are not required or are in a stable condition.
7	Bank protection is in need of minor repairs. River control devices and embankment protection have a little minor deficiency. Banks and/or channel have minor amounts of drift.
6	Bank is beginning to slump. River control devices and embankment protection have widespread minor deficiency. There is minor streambed movement evident. Debris is restricting the channel slightly.
5	Bank protection is being eroded. River control devices and/or embankment have major deficiency. Trees and brush restrict the channel.
4	Bank and embankment protection is severely undermined. River control devices have severe deficiency. Large deposits of debris are in the channel.
3	Bank protection has failed. River control devices have been destroyed. Streambed aggradation, degradation, or lateral movement has changed the channel to now threaten the bridge and/or approach roadway.
2	The channel has changed to the extent the bridge is near a state of collapse.
1	Bridge closed because of channel failure. Corrective action may put bridge back in light service.
0	Bridge closed because of channel failure. Replacement necessary.

#### **5.4.2. Programmazione degli interventi secondo gli Stati Uniti d'America**

La programmazione degli interventi viene definita, secondo FHWA dal “Sufficiency Rating” (*S.R.*), valore numerico compreso tra 0 e 100 che definisce lo stato complessivo di salute dell’opera. In particolare:

$$S.R. = S_1 + S_2 + S_3 - S_4$$

Dove:

- $S_1$ : Coefficiente di sicurezza a adeguatezza strutturale, sulla base del “Condition Rating”;
- $S_2$ : Condizioni di servizio e obsolescenza funzionale, sulla base del “Appraisal Rating”;
- $S_3$ ; Strategicità del ponte;

- $S_4$ : Coefficiente di riduzione che tiene conto di eventuali deviazioni, caratteristiche di sicurezza del traffico e tipologia di struttura.

Il  $S.R.$  viene impiegato per confrontare i ponti che costituiscono la rete stradale americana per scopi di finanziamento federale per eventuali riparazioni delle opere. In particolare, viene associata maggiore priorità a valori bassi dell'indice.

## 5.5. Metodo secondo l'Inghilterra

Il metodo presentato viene applicato esclusivamente nei ponti presenti in Inghilterra, con conseguente implementazione nei locali BMS come "BridgeStation".

### 5.5.1. Valutazione del degrado secondo l'Inghilterra

La fase di valutazione del degrado è preceduta dalla fase di ispezione visiva, come specificato dalla "United Kingdom Highways Agency". Le ispezioni si basano sui parametri "Extension" e "Severity" che caratterizzano il difetto, come visibile in Tabella 10.

Tabella 10: Valutazione di Extension e Severity del difetto

	Code	Description
Extent	A	No significant defect.
	B	Slight, less than 5% of length/area affected.
	C	Moderate; 5% – 20% of area/length affected.
	D	Wide, 20% – 50% affected.
	E	Extensive; over 50% of surface area/length.
Severity	1	As new, or has no significant defect.
	2	Early signs of deterioration, minor defect.
	3	Moderate, some loss of functionality expected.
	4	Severe defect and/or element is close to failure.
	5	The element is non-functional/failed.

Tale metodo di valutazione riduce la componente soggettiva nella valutazione delle condizioni della struttura.

Viene definito il "Bridge Condition Index" ( $BCI$ ) per monitorare la variazione di stato degli elementi della struttura, con valori compresi tra 0 e 100. A valori maggiori di  $BCI$  si associano migliori condizioni della struttura. La relazione che esprime  $BCI$  è:

$$BCI = - F1 \left[ F2 \frac{S(Efp Sf)}{Np} + F3 \frac{S(Efp Sf)}{Ns} \right]$$

Dove:

- $E_{fp}$  ed  $E_{fs}$  sono i coefficienti per gli elementi primari e secondari;
- $S_r$  è definito dalla combinazione dei fattori estensione e severità, variabili rispettivamente da un valore A a D e da 1 a 4;
- $N_p$  e  $N_s$  sono il numero di elementi principali e secondari che formano il ponte;
- $F_1, F_2$  e  $F_3$  sono fattori numerici assegnati.

Se i difetti presenti sono classificati “A1”, il valore di  $BCI$  risulterà essere 100, in caso contrario questo valore diminuirà. Inoltre, l’indice  $BCI$  viene moltiplicato per un “Age Factor” come segue:

$$Target\ BCI = BCI \frac{Age\ Factor}{100}$$

Per tenere conto dell’influenza degli elementi non ispezionati si introduce il “Fattore di Confidenza” ( $CF$ ), espresso come:

$$CF = 100 \left( \frac{n}{ntot} \right)$$

Dove “n” è il numero di elementi ispezionati e “ntot” è il numero totale di elementi che formano il ponte.

### 5.5.2. Programmazione degli interventi secondo l’Inghilterra

La programmazione degli interventi viene eseguita mediante software BMS, in particolare con il software inglese “BridgeStation”. Quest’ultimo classifica i ponti in 5 classi sulla base del valore  $BCI$  ottenuto, come visibile in Figura 13.

Figura 13: Classi derivanti dal valore di  $BCI$  del ponte

Structure Condition Index Key	
Very Good	>=90 & <=100
Good	>=80 & <90
Fair	>=65 & <80
Poor	>=40 & <65
Very Poor	>=0 & <40

Il “Guidance Document for Performance Measurement of Highway Structures” rilasciato dalla Highways Agency definisce le procedure per determinare l’indice  $BCI$  di “BridgeStation”. Lo stato manutentivo dell’opera viene valutato come visibile nella relazione a pagina seguente:

$$BCI = 0.6 BCI_{AVERAGE} + 0.4 BCI_{CRITICAL}$$

Dove:

- $BCI_{AVERAGE}$ : Valuta il danneggiamento di tutti gli elementi della struttura;
- $BCI_{CRITICAL}$ : Tiene conto esclusivamente dei danni potenzialmente critici per il comportamento globale del ponte

## 5.6. Metodo secondo la Rete Ferroviaria Italiana (RFI)

Come già specificato in precedenza, RFI impiega un software BMS proprietario denominato “Sistema D.O.M.U.S.” composto dai seguenti componenti di gestione:

- Sistema di inventario: Ogni ponte e viadotto vengono censiti nel sistema informatico aziendale “INRETE 2000” attraverso una "Sede Tecnica";
- Sistema di ispezione: I difetti vengono registrati tramite un tablet con installato il software DOMUS. Per standardizzare la procedura di riconoscimento e registrazione dei difetti sono stati implementati un catalogo dei difetti e le “Schede Anagrafiche” utili all'ispettore;
- Sistema di valutazione: Dai dati registrati si procede alla determinazione di opportuni indici di seguito enunciati;
- Sistema decisionale: Per definire la priorità di intervento.

### 5.6.1. Valutazione del degrado secondo la Rete Ferroviaria Italiana

Le schede di catalogo dei difetti permettono di esprimere, per ogni opera censita, i seguenti coefficienti:

- Coefficiente di Importanza ( $B$ ): Esprime i potenziali effetti del difetto sulla sicurezza e durabilità dell'elemento interessato con valori variabili da 1 a 4 con severità crescente;
- Coefficiente di Estensione ( $K3$ ): Viene valutato sulla base di quantità misurabili con valori variabili crescenti pari a 0.5-1.0-1.5-2.0 all'aumentare dell'estensione;
- Coefficiente di Intensità ( $K2$ ): Valutato anch'esso su grandezze misurabili, assume i valori del coefficiente ( $K3$ ).

Mediante le “Schede Anagrafiche” si può definire la posizione del difetto sulla struttura.

Dai dati sopra registrati, mediante gli algoritmi di calcolo dell'applicativo D.O.M.U.S., si valutano una serie di indici che quantificano lo stato di conservazione dell'opera. Gli indici generati sono:

- Indice D.O.M.U.S.: Rappresenta lo stato di ammaloramento dell'opera;

- Indice D.O.M.U.S. 2.0: Necessario all'ispettore per definire il “Codice di Giudizio” in merito all'efficienza dell'opera;
- Indice Proiettato: Rappresenta la possibile evoluzione dei difetti.

### **5.6.2. Programmazione degli interventi secondo la Rete Ferroviaria Italiana**

Per disciplinare il flusso di informazioni e le modalità operative per la gestione delle risorse per la manutenzione ordinaria, straordinaria e la realizzazione degli investimenti si utilizzano i presenti criteri:

- Definizione con il “Piano d'Impresa” delle azioni da inserire nel “Piano di Sicurezza” e gli interventi da eseguire;
- Pianificazione delle attività di manutenzione e sviluppo;
- Privilegiare gli interventi manutentivi sulle linee con maggiore traffico.

Viene data priorità alle opere progettate prima del 1984 ubicate in zona sismica di 1° e 2° categoria come quanto indicato dall'Ordinanza “3274/2003”. Ad ogni tipologia di opera verrà definita la modalità di esecuzione delle verifiche con appositi capitolati tecnici, con priorità alle verifiche sismiche.

### **5.7. Confronto tra metodi di valutazione del degrado esistenti**

Nei precedenti paragrafi sono stati trattati i diversi metodi impiegati per la quantificazione del danno e la programmazione derivante da esso. Gli aspetti che verranno considerati nel confronto sono:

- A. Il metodo considera tutti gli elementi che costituiscono la struttura;
- B. Il metodo tiene conto della correlazione tra gli elementi della struttura;
- C. Il metodo considera in modo diretto l'estensione e la severità del degrado;
- D. Il metodo considera la posizione del degrado nella struttura e nei suoi elementi;
- E. Ripetibilità e confrontabilità del metodo con condizioni passate o con altre strutture;
- F. Distinzione dei difetti localizzati sugli elementi della struttura;
- G. Implementazione del metodo tramite BMS.

La Tabella 11 a pagina seguente riassume il confronto dei metodi sulla base dei parametri sopra descritti.

Tabella II: Confronto tra metodi di valutazione del degrado nelle strutture

<b>Metodo di valutazione del degrado</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
CIAS, Italia	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
Pellegrino et Al, Italia	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI
Linee Guida per i Ponti Esistenti, Italia	SI						
FHWA, Stati Uniti d’America	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI
Highways Agency, Inghilterra	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
D.O.M.U.S., RFI, Italia	SI	*	SI	SI	SI	*	SI
Con “*” si indica l’incertezza dell’effettivo parametro del metodo.							

Dal confronto emerge che:

- Tutti i metodi prevedono la valutazione della struttura mediante scomposizione in componenti minori, valutati singolarmente per quanto riguarda il degrado;
- Alcuni metodi non distinguono i difetti in base alla loro gravità sugli elementi critici della struttura e non considerano la possibile correlazione tra gli elementi;
- La maggior parte dei metodi considerano l’estensione e l’intensità del degrado in modo diretto nella determinazione dell’indice di condizione della struttura;
- Il metodo adottato dagli Stati Uniti d’America considera i parametri come posizione, intensità e severità in modo indiretto, il metodo di “Pellegrino et Al” considera altri parametri;
- Tutti i metodi sono ripetibili e implementabili tramite BMS per una valutazione approfondita che tenga conto dell’evoluzione del degrado nel tempo e lo stato di eventuali strutture vicine;
- Il “Metodo D.O.M.U.S”. si rivela essere uno dei metodi più accurati.



# Capitolo 6: Analisi e confronto di due casi studio

Saranno oggetto del presente confronto due ponti esistenti presenti nel Comune di Loreggia in provincia di Padova. La trattazione riguarderà i Livelli 0, 1 e 2 delle Linee Guida per i Ponti Esistenti, con la determinazione della “Classe di Attenzione Strutturale e Fondazionale” delle opere. Non sono state impiegate le schede fornite dal “Ministero delle Infrastrutture e Trasporti” per le fasi di censimento e ispezione ma bensì una rielaborazione delle tali.

## 6.1. Caso studio 1

Il ponte oggetto di analisi è locato nel Comune di Loreggia lungo la Strada Regionale 307 “Strada del Santo” e permette il superamento del torrente Muson dei Sassi, visibile in Figura 14. L’opera è stata costruita negli anni Trenta, resistendo ai danni provocati durante la guerra e subendo due alluvioni, in particolare si cita la piena del Muson dei Sassi del 1998. Il traffico pesante, a favore di sicurezza, da oltre dieci anni è stato dirottato sulla nuova SS308.



*Figura 14: Caso studio 1 - Ponte sul Muson dei Sassi, Loreggia (PD)*

### 6.1.1. Livello 0

La prima fase di analisi prevede il censimento dell’opera interessata.

Si allega la scheda di censimento del ponte in Tabella 12 a pagina seguente, nonché “Livello 0” delle Linee Guida, fornite nell’“Allegato B”.

Tabella 12: Caso studio 1 - Sintesi della “Scheda di censimento ponti”, Livello 0

Sintesi delle Schede di censimento ponti			Livello 0
<b>Nome Ponte/Viadotto</b>	Ponte sul Muson dei Sassi	<b>Strada di appartenenza</b>	Strada Regionale 307
<b>Localizzazione</b>			
<b>Provincia/Regione</b>	Padova, Veneto	<b>Coordinate Geografiche (WGS84)</b>	
<b>Comune</b>	Loreggia	<b>Centro</b>	45,5800170 11,9391755
<b>Sismicità dell'area [a<sub>g</sub>/g]</b>	Tra 0.05 e 0.15	<b>Iniziale</b>	45,5801552 11,9392442
<b>Ente gestore</b>	Veneto Strade S.P.A.	<b>Finale</b>	45,5797788 11,9390696
<b>Dati di progetto</b>			
<b>Anno di costruzione</b>	1931	<b>Anno di progettazione</b>	Non noto
<b>Stato dell'opera</b>			
Agibile ma con scadenze di lavori di manutenzione straordinaria.			
<b>Classificazione del collegamento e Classificazione d'uso stradale</b>			
<b>Tipo di collegamento</b>	Ponte su corso d'acqua	<b>Classificazione d'uso stradale</b>	Strada extraurbana secondaria
<b>Caratteristiche geometriche</b>			
<b>Luce complessiva</b>	45 m stimata	<b>N° Campate</b>	3
<b>Largh. impalcato</b>	7 m	<b>Luce campate</b>	15 m di media
<b>Tracciato</b>	In curva (leggermente)	<b>Categoria di progetto</b>	-
<b>Tipologia strutturale</b>			
<b>Travate appoggiate</b>	Calcestruzzo armato	<b>Spalle</b>	Calcestruzzo armato
<b>Pile</b>		<b>Impalcato</b>	
<b>Geometria sezione</b>	Quadrata	<b>Materiale costruttivo</b>	Calcestruzzo armato
<b>Altezza pile (stimata)</b>	3 m	<b>Tipologia soletta</b>	Calcestruzzo armato
<b>Interventi di manutenzione</b>			
Finanziamento PNRR “Misure per la gestione del rischio di alluvione e per la riduzione del rischio idrogeologico” con importo di 2,50 Milioni di euro. Attuato da Veneto Strade S.P.A.			
<b>Rete stradale</b>			
<b>N° carreggiate</b>	1	<b>N° corsie/carreggiata</b>	2

<b>Presenza di curve</b>	Sì	<b>Presenza di alternative stradali</b>	Sì
<b>TGM</b>	Non disponibile	<b>TGM Veicoli commerciali</b>	Non disponibile

### 6.1.2. Livello 1

Effettuato il censimento dell'opera, si è proceduto con il "Livello 1" compilando le "Schede descrittive di ispezione ponti". I dati relativi alla localizzazione, alla tipologia strutturale e delle fondazioni sono riportati nella Tabella 12 soprastante.

La natura torrentizia della corrente d'acqua e gli snodi idraulici a cui è collegato il Fiume Muson, in caso di piene, configurano quest'opera come una strozzatura idraulica. Sono state rilevate inoltre erosioni sulle sponde arginali nella prossimità del ponte.

Segue l'identificazione dei difetti e del degrado presente sull'opera con le apposite "Schede di Valutazione" dei difetti, considerando tutti gli elementi che formano il ponte.

Per rendere più celere la trattazione, i difetti presenti notati sull'opera sono esplicitati nella Tabella 13, con i relativi pesi. Si riportano inoltre i difetti rilevati sulla pavimentazione stradale. Non è stato possibile accedere al di sotto del ponte.

*Tabella 13: Caso studio 1 - Difetti rilevati*

<b>Difetti rilevati</b>	<b>Peso G</b>
Macchie di umidità attiva	3
Calcestruzzo dilavato/ammalorato	3
Vespai	2
Distacco del copriferro	2
Armatura ossidata e/o corrosa	5
Fessure verticali	2
Lesioni attacco pilastri	3
Tracce di scolo	3
<b>Elementi accessori</b>	
Stato pavimentazione	1
Sottoservizi mal ancorati	2
Guardiavia danneggiati	2

Si allega in Figura 15 la documentazione fotografica relativa ai difetti rilevati nell'ispezione in data 08.05.2024. La pavimentazione stradale è stata riportata tramite il Portale "Google Maps", con immagini risalenti ad aprile 2023.



*Figura 15: Caso studio 1 - Documentazione fotografica relativa ai difetti rilevati*

Il ponte è soggetto ai tipici difetti che affliggono il calcestruzzo, come il fenomeno di dilavamento, distacco del copriferro e macchie di umidità. Non sono state rilevate fessure diagonali e altri difetti con peso ( $G$ ) pari a 5 come l'armatura longitudinale deformata e fessure trasversali. La pavimentazione stradale non soffre di gravi difetti. A causa del mancato accesso al di sotto del ponte, non si sono potuti identificare ulteriori difetti potenzialmente più gravosi sulla struttura. Verrà tenuto conto di tale situazione in fase di definizione del "Livello di Difettosità".

### 6.1.3. Livello 2

Si è proceduto con la definizione delle "Classi di Pericolosità", di "Vulnerabilità" e di "Esposizione" per la determinazione della "Classe di Attenzione Strutturale e Fondazionale". I parametri considerati sono visibili in Tabella 14. Si specifica che in caso di mancata o limitata conoscenza di tali parametri si considera la classe peggiore risultante nelle future tabelle di valutazione.

*Tabella 14: Parametri primari e secondari per la determinazione di fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione strutturale e fondazionale*

	Parametri primari	Parametri secondari
<b>Pericolosità</b>	Entità dei carichi presenti con particolare riferimento al transito di trasporto eccezionale	-
<b>Vulnerabilità</b>	Livello di difettosità Schema statico, luce, materiale e numero di campate	Rapidità di evoluzione del degrado Norma di progettazione
<b>Esposizione</b>	Livello di TGM e luce media della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Trasporto di merci pericolose

#### a. Pericolosità

La "Pericolosità" è legata alla probabilità che il ponte sia soggetto al passaggio di carichi di massa rilevante, ovvero veicoli con portata superiore a 3,5 t., valutabile nella Tabella 15. A favore di sicurezza, per il ponte oggetto di analisi, si considera la "Classe A".

Incrociando la classe della strada con la frequenza con cui è previsto il transito di carichi di massa significativa, si individua la "Classe di Pericolosità" del ponte, come indicato in Tabella 16, risultante "Alta".

La frequenza dei passaggi di veicoli commerciali viene definita sulla base del numero medio di veicoli commerciali previsti su una singola corsia di marcia nell'arco di una giornata (24h),

classificato come visibile in Tabella 17. Si è scelto di adoperare la classe di frequenza peggiore a favore di sicurezza.

*Tabella 15: Caso studio 1 - Classificazione delle strade in funzione della massima massa ammissibile*

*(\*) le percentuali sono riferite ai carichi concentrati su due assi in tandem, complessivamente pari a 600 kN, previsti dallo schema di carico I delle Norme Tecniche*

<b>Classe A</b>	Carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche
<b>Classe B</b>	Limitazione di carico a 44 t ( $\approx 73\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)
<b>Classe C</b>	Limitazione di carico a 26 t ( $\approx 43\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)
<b>Classe D</b>	Limitazione di carico a 8,0 t ( $\approx 13\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)
<b>Classe E</b>	Limitazione di carico a 3,5 t ( $\approx 6\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)

*Tabella 16: Caso studio 1 - Estratto della Tabella 4.3. delle Linee Guida per determinare la Classe di Pericolosità*

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

*Tabella 17: Caso studio 1 - Frequenza del transito di veicoli commerciali per singola corsia di marcia*

Alta	Media	Bassa
$\geq 700$ veicoli/giorno	$300 < \text{veicoli /giorno} < 700$	$\leq 300$ veicoli/giorno

#### b. Vulnerabilità

Come visibile in Tabella 14, vi è la necessità di definire ulteriori parametri primari e secondari. Il primo è il “Livello di Difettosità”, che descrive lo stato di conservazione dell’opera grazie alle

ispezioni visive del “Livello 1” e della relativa compilazione delle “Schede Difettologiche”. I valori che può assumere sono riassunti nella Tabella 18.

Poiché l’ispezione svolta è stata marginale e non è stato possibile accedere al di sotto del ponte, a favore di sicurezza, la condizione che meglio descrive il ponte oggetto di caso studio è la classe “Medio”, nonostante i difetti rilevati non abbiano peso significativo e massimo.

Tabella 18: Caso studio 1 - Livelli di Difettosità

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

Lo schema statico, luce, materiale e numero delle campate formano il secondo parametro. Si riporta in Tabella 19 i valori assumibili dalla “Classe di Vulnerabilità”, con risultato della classe “Media”. Per ponti con numero di campate inferiore a tre non viene aumentata la classe ottenuta.

Tabella 19: Caso studio 1 - Estratto della Tabella 4.6. delle Linee Guida per determinare la Classe di vulnerabilità in funzione dello schema statico, luce, materiale e numero di campate

Schema statico	Materiale	$L \leq 5$ m	$5$ m < $L < 15$ m	$15$ m $\leq L < 25$ m	$L \geq 25$ 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

La rapidità di evoluzione del degrado integra la valutazione del “Livello di Difettosità”. In particolare, il ponte analizzato è stato costruito precedentemente al 1945. Sfruttando questo dato

si può ricondurre la costruzione del ponte alla “Norma di Riferimento”, in particolare viene scelta la “Classe A” per ponti di “I categoria” progettati con norme pubblicate antecedentemente al 1952. Definiti tutti i parametri, si procede alla definizione della “Classe di Vulnerabilità” finale, come visibile nel flusso visibile in Figura 16. La classe risultante è “Media”.

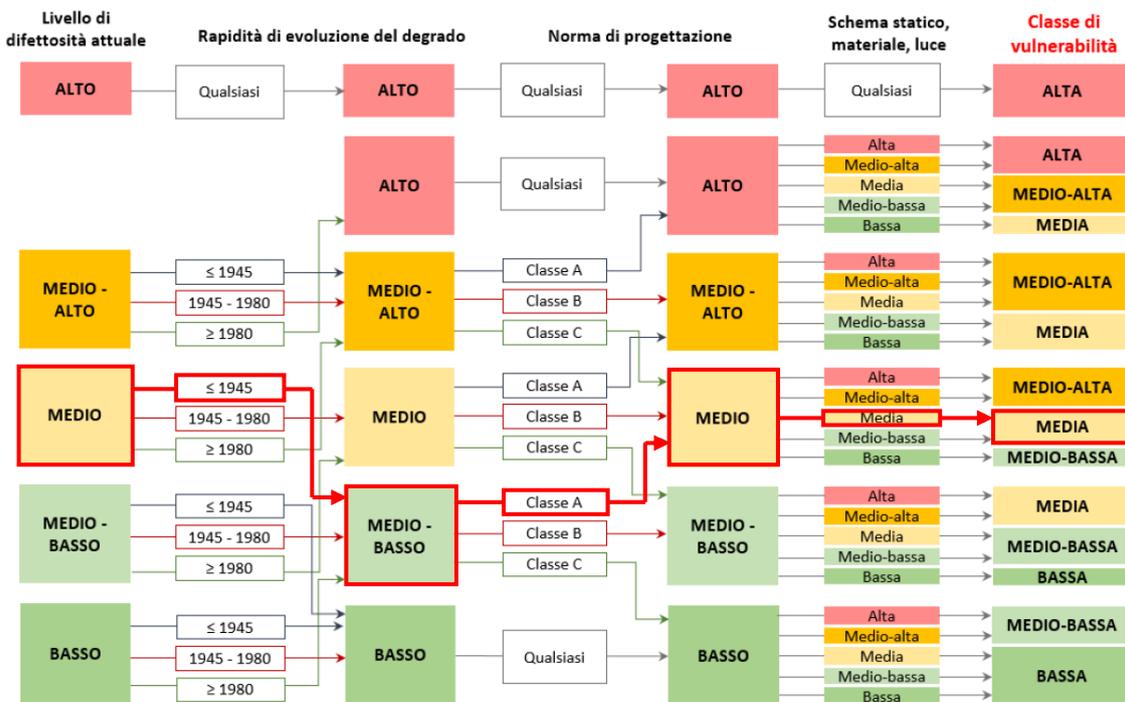


Figura 16: Caso studio 1 - Flusso logico per la determinazione della Classe di Vulnerabilità

### c. Esposizione

La stima del livello di esposizione si basa su altrettanti parametri definiti in Tabella 14.

Analogamente alle altre classi, come risultato si otterranno cinque classi di esposizione che descrive la resilienza dell’opera.

Il primo parametro è la tipologia e il volume di traffico, accertato tramite il “Livello 0” dell’approccio multilivello e definisce il volume di traffico previsto in termini di “Traffico Medio Giornaliero” (TGM), come visibile in Tabella 20 sottostante. A favore di sicurezza si è deciso di adoperare la classe “Media”.

Tabella 20: Caso studio 1 - Livello di Traffico Medio Giornaliero (veicoli/giorno sull'intera carreggiata)

Alta	Media	Bassa
≥ 25000 veicoli/giorno	10000 < veicoli /giorno < 25000	≤ 10000 veicoli/giorno

Il livello di *TGM* è poi corretto tramite la Tabella 21, in funzione della luce media della campata del ponte. Il ponte oggetto di valutazione è definito dalle Linee Guida con “Piccola Luce”, con luce media inferiore a 20 m. Il *TGM* corretto assume il valore di classe “Medio-Bassa”.

*Tabella 21: Caso studio 1 - Traffico Medio Giornaliero e luce media della campata del ponte*

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

La presenza di alternative stradali limita il possibile disagio causato da chiusure o limitazioni di traffico sul ponte. Nel caso in esame sono individuabili altri itinerari stradali per cui si considera la classe di *TGM* sopra corretta di giusta entità. In caso di mancati itinerari la classe identificata di *TGM* e “Luce media della campata” viene aumentata.

Per quanto riguarda la tipologia di ente scavalcato, il livello di esposizione è espresso in tre classi visibili nella Tabella 22. La classe scelta è “Media” data l’importanza della strada su cui è locato il ponte.

*Tabella 22: Caso studio 1 - Tipologia di ente scavalcato*

<b>ALTA</b>	Ente scavalcato il cui uso preveda affollamenti significativi e/o con funzioni pubbliche e sociali essenziali e/o la cui interruzione provochi situazioni di emergenza e/o enti di elevato valore naturalistico, economico e sociale (Ferrovia, zona edificata/antropizzata, strade a viabilità primaria, etc.)
<b>MEDIA</b>	Ente scavalcato il cui uso preveda normali affollamenti, senza funzioni pubbliche e sociali essenziali, la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza e/o enti con limitato valore naturalistico, economico e sociale (strade a viabilità secondaria, corsi d’acqua, laghi, specchi d’acqua marini, etc.)
<b>BASSA</b>	Ente scavalcato con presenza occasionale di persone e privi di valore naturalistico, economico e sociale (discontinuità naturali, depressioni del terreno, etc.)

Si valuta infine il trasporto di merci pericolose che possono produrre danni alle persone e all’ambiente. Questo parametro secondario genera un incremento di esposizione e quindi di classe di attenzione. Si considera un trasporto di merci pericolose occasionale.

Con i dati sopra definiti si definisce la “Classe di esposizione” risultante mediante il flusso logico espresso in Figura 17 a pagina seguente. È risultata la Classe “Medio-Bassa” di esposizione.

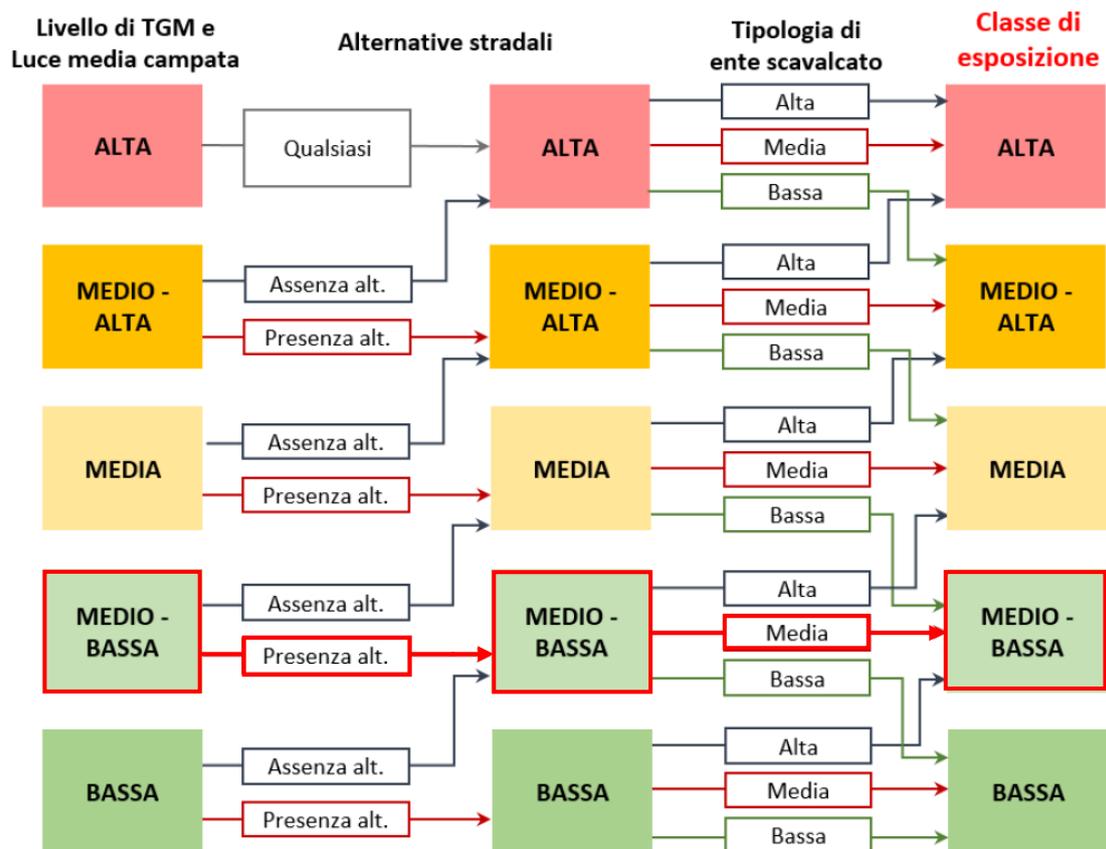


Figura 17: Caso studio 1 - Flusso logico per la definizione della Classe di Esposizione

d. Definizione della “Classe di attenzione strutturale e fondazionale”

Si procede infine con la definizione della “Classe di attenzione strutturale e fondazionale” sfruttando la Tabella 23. I risultati ottenuti per le precedenti classi sono:

- Classe di Pericolosità: Alta;
- Classe di Vulnerabilità: Media;
- Classe di Esposizione: Medio-Bassa.

Tabella 23: Caso studio 1 - Estratto della Tabella 4.10. delle Linee Guida per la determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale

		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	

La “Classe di Attenzione strutturale e fondazionale” ottenuta tramite flussi e operatori logici è risultata essere “Media”. Si rimanda al confronto tra casi studio per maggiori dettagli.

## 6.2. Caso studio 2

Il ponte oggetto di analisi è locato nel Comune di Loreggia lungo la Strada Provinciale 44 “S. Ambrogio” e permette il superamento del torrente Muson dei Sassi, visibile in Figura 18. L’opera originale risale all’Ottocento e consisteva in un manufatto in muratura ad arco. Negli anni 2005-2006 ha subito un rifacimento totale.



Figura 18: Caso studio 2 - “Ponte di Rustega” sul Muson dei Sassi, Loreggia (PD)

### 6.2.1. Livello 0

La prima fase di analisi prevede il censimento dell’opera interessata. Si allega la “Scheda di censimento” del ponte in Tabella 24 sottostante, nonché “Livello 0” delle Linee Guida, fornite nell’“Allegato B”. Il ponte è formato da struttura ad arco ribassato a via di corsa inferiore, con impalcato in acciaio e calcestruzzo armato sorretto da travi parapetto in acciaio fuori spessore. La soluzione rappresenta un arco divergente a spinta eliminata.

Tabella 24: Caso studio 2 – Sintesi della Scheda di censimento ponti, Livello 0

Sintesi delle Schede di censimento ponti			Livello 0
Nome Ponte/Viadotto	Ponte di Rustega	Strada di appartenenza	Strada Provinciale 44
<b>Localizzazione</b>			
Provincia/Regione	Padova, Veneto	Coordinate Geografiche (WGS84)	

<b>Comune</b>	Loreggia	<b>Centro</b>	45.5751930, 11.9400736
<b>Sismicità dell'area [a<sub>g</sub>/g]</b>	Tra 0.05 e 0.15	<b>Iniziale</b>	45.5751572, 11.9402480
<b>Ente gestore</b>	Veneto Strade S.P.A.	<b>Finale</b>	45.5752252, 11.93992704
<b>Dati di progetto</b>			
<b>Anno di costruzione</b>	Ottocento	<b>Anno di rifacimento</b>	2005-2006
<b>Stato dell'opera</b>			
Pienamente agibile			
<b>Classificazione del collegamento e Classificazione d'uso stradale</b>			
<b>Tipo di collegamento</b>	Ponte su corso d'acqua	<b>Classificazione d'uso stradale</b>	Strada extraurbana secondaria
<b>Caratteristiche geometriche</b>			
<b>Luce complessiva</b>	25 m stimati	<b>N° Campate</b>	1
<b>Larghezza totale impalcato</b>	9 m	<b>Luce campate</b>	25 m stimati
<b>Tracciato</b>	Rettilineo	<b>Categoria di progetto</b>	-
<b>Tipologia strutturale</b>			
<b>Struttura ad arco</b>	Acciaio	<b>Spalle</b>	Calcestruzzo armato
<b>Pile</b>		<b>Impalcato</b>	
<b>Geometria sezione</b>	-	<b>Materiale costruttivo</b>	Acciaio e calcestruzzo armato
<b>Altezza pile (stimata)</b>	-	<b>Tipologia soletta</b>	Calcestruzzo armato
<b>Interventi di manutenzione</b>			
-			
<b>Rete stradale</b>			
<b>N° carreggiate</b>	1	<b>N° corsie/carreggiata</b>	2
<b>Presenza di curve</b>	No	<b>Presenza di alternative stradali</b>	Sì
<b>TGM</b>	Non disponibile	<b>TGM Veicoli commerciali</b>	Non disponibile

### 6.2.2. Livello 1

Effettuato il censimento dell'opera, si è proceduto con il "Livello 1", compilando le "Schede descrittive di ispezione ponti". I dati relativi alla localizzazione, alla tipologia strutturale e delle fondazioni sono riportati nella Tabella 24 soprastante.

Segue l'identificazione dei difetti e del degrado presente sull'opera con le apposite "Schede di Valutazione" dei difetti, considerando tutti gli elementi che formano il ponte.

Per rendere più celere la visione dei difetti, si riassumono i difetti presenti notati sull'opera in Tabella 25.

*Tabella 25: Caso studio 2 – Difetti rilevati*

<b>Difetti rilevati</b>	<b>Peso G</b>
Sfogliamento vernice	2
Ossidazione	2
<b>Elementi accessori</b>	
Stato della pavimentazione	1

Il ponte in oggetto di caso studio non presenta difetti di grave intensità. Vi è un inizio di sfogliamento della vernice e di ossidazione che interessa le componenti in acciaio. Non sono presenti dislivelli nei giunti della pavimentazione. La pavimentazione stradale è soggetta a lievi fessure. In Figura 19 a pagina seguente si riporta invece la documentazione fotografica riguardante l'opera dall'ispezione visiva in data 18.07.2024. Il ponte è in buono stato di conservazione.



*Figura 19: Caso studio 2 – Documentazione fotografica relativa ai difetti rilevati*

### 6.2.3. Livello 2

Si è proceduto con la definizione delle “Classi di Pericolosità”, di “Vulnerabilità” e di “Esposizione” per la determinazione della “Classe di Attenzione Strutturale e Fondazionale”.

I parametri considerati sono visibili in Tabella 14. Si specifica che in caso di mancata o limitata conoscenza di tali parametri si considera la classe peggiore risultante nelle future tabelle di valutazione.

*Tabella 14: Parametri primari e secondari per la determinazione di fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione strutturale e fondazionale*

	Parametri primari	Parametri secondari
<b>Pericolosità</b>	Entità dei carichi presenti con particolare riferimento al transito di trasporto eccezionale	-
<b>Vulnerabilità</b>	Livello di difettosità Schema statico, luce, materiale e numero di campate	Rapidità di evoluzione del degrado Norma di progettazione
<b>Esposizione</b>	Livello di TGM e luce media della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Trasporto di merci pericolose

#### a. Pericolosità

La “Pericolosità” è legata alla probabilità che il ponte sia soggetto al passaggio di veicoli con portata superiore a 3,5 t., valutabile nella Tabella 27. A favore di sicurezza è stata considerata la “Classe A”.

*Tabella 26: Caso studio 2 – Classificazione delle strade in funzione della massima massa ammissibile*

*(\*) le percentuali sono riferite ai carichi concentrati su due assi in tandem, complessivamente pari a 600 kN, previsti dallo schema di carico I delle Norme Tecniche*

<b>Classe A</b>	Carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche
<b>Classe B</b>	Limitazione di carico a 44 t ( $\approx 73\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)
<b>Classe C</b>	Limitazione di carico a 26 t ( $\approx 43\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)
<b>Classe D</b>	Limitazione di carico a 8,0 t ( $\approx 13\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)
<b>Classe E</b>	Limitazione di carico a 3,5 t ( $\approx 6\%$ dei carichi di progetto previsti dalle Norme Tecniche) (*)

Incrociando la classe della strada con la frequenza con cui è previsto il transito di carichi di massa significativa, si individua la “Classe di Pericolosità” del ponte, come indicato in Tabella 28, risultante “Alta”.

Tabella 27: Caso studio 2 – Estratto della Tabella 4.3. delle Linee Guida per determinare la Classe di Pericolosità

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

La frequenza dei passaggi di veicoli commerciali viene definita sulla base del numero medio di veicoli commerciali previsti su una singola corsia di marcia nell'arco di una giornata (24h), classificato come visibile in Tabella 29.

Si è scelto di adoperare la classe di frequenza peggiore a favore di sicurezza.

Tabella 28: Caso studio 2 – Frequenza del transito di veicoli commerciali per singola corsia di marcia

Alta	Media	Bassa
$\geq 700$ veicoli/giorno	$300 < \text{veicoli /giorno} < 700$	$\leq 300$ veicoli/giorno

#### b. Vulnerabilità

Come visibile in Tabella 14, vi è la necessità di definire ulteriori parametri. Il primo è il “Livello di Difettosità”, che descrive lo stato di conservazione dell'opera grazie alle ispezioni visive del “Livello 1” e della relativa compilazione delle “Schede Difettologiche”. I valori che può assumere sono riassunti nella Tabella 30 a pagina seguente. La condizione che meglio descrive il ponte oggetto di studio è la classe “Basso”. Essendo stato progettato nel 2005, le Linee Guida prevedono l'assegnazione di una classe “Medio” o “Medio-Basso”. I difetti presenti sull'opera sono riassunti nella Tabella 27 a pagina seguente.

Tabella 29: Caso studio 2 – Livelli di Difettosità

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

Lo schema statico, luce, materiale e numero delle campate formano il secondo parametro. Si riporta in Tabella 31 i valori assumibili dalla “Classe di Vulnerabilità”. Il suddetto ponte non è riconducibile agli schemi statici forniti dalle Linee Guida, si considera quindi la classe più gravosa tra le due inizialmente considerate, ovvero “Media-Alta”.

Tabella 30: Caso studio 2 – Estratto della Tabella 4.6. delle Linee Guida per determinare la Classe di vulnerabilità in funzione dello schema statico, luce, materiale e numero di campate

Schema statico	Materiale	$L \leq 5$ m	$5$ m < $L < 15$ m	$15$ m $\leq L < 25$ m	$L \geq 25$ m
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

La rapidità di evoluzione del degrado integra la valutazione del “Livello di Difettosità”. In particolare, il ponte analizzato è di recente costruzione, facilmente riconducibile alla “Norma di Riferimento” di “Classe C” per ponti di “I e II categoria” progettati con norme pubblicate dal 2005.

Definiti tutti i parametri, si procede alla definizione della “Classe di Vulnerabilità” finale, come visibile nel flusso visibile in Figura 20 a pagina seguente. La classe risultante è “Medio-Bassa”.

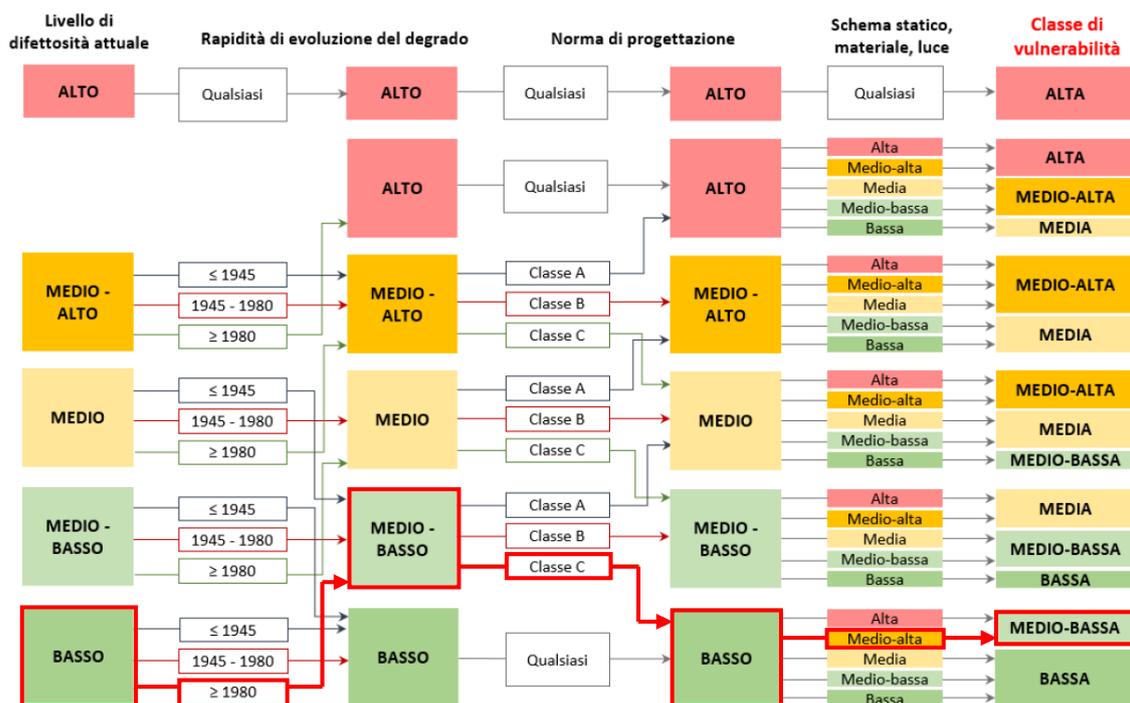


Figura 20: Caso studio 2 – Flusso logico per la determinazione della Classe di Vulnerabilità

c. Esposizione

La stima del livello di esposizione si basa su altrettanti parametri definiti in Tabella 14.

Analogamente alle altre classi, come risultato si otterranno cinque classi di esposizione che descrive la resilienza dell’opera.

Il primo parametro è la tipologia e il volume di traffico, accertato tramite il “Livello 0” dell’approccio multilivello e definisce il volume di traffico previsto in termini di “Traffico Medio Giornaliero” (*TGM*), come visibile in Tabella 32 sottostante. A favore di sicurezza si è deciso di adoperare la classe “Media”.

Tabella 31: Caso studio 2 – Livello di Traffico Medio Giornaliero (veic./giorno sull’intera carreggiata)

Alta	Media	Bassa
≥ 25000 veicoli/giorno	10000 < veicoli /giorno < 25000	≤ 10000 veicoli/giorno

Il livello di *TGM* è poi corretto tramite la Tabella 33, in funzione della luce media della campata del ponte. Il ponte oggetto di valutazione è definito dalle Linee Guida con “Media Luce”, con luce media compresa tra i 20 m e i 50 m. Il *TGM* corretto assume il valore di classe “Medio”.

Tabella 32: Caso studio 2 – Traffico Medio Giornaliero e luce media della campata del ponte

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

La presenza di alternative stradali limita il possibile disagio causato da chiusure o limitazioni di traffico sul ponte. Nel caso in esame sono individuabili altri itinerari stradali per cui si considera la classe di *TGM* sopra corretta di giusta entità. In caso di mancati itinerari la classe identificata di *TGM* e “Luce media della campata” viene aumentata.

Per quanto riguarda la tipologia di ente scavalcato, il livello di esposizione è espresso in tre classi visibili nella Tabella 34. La classe scelta è “Media” data l’importanza della strada su cui è locato il ponte.

Tabella 33: Caso studio 2 – Tipologia di ente scavalcato

<b>ALTA</b>	Ente scavalcato il cui uso preveda affollamenti significativi e/o con funzioni pubbliche e sociali essenziali e/o la cui interruzione provochi situazioni di emergenza e/o enti di elevato valore naturalistico, economico e sociale (Ferrovia, zona edificata/antropizzata, strade a viabilità primaria, etc.)
<b>MEDIA</b>	Ente scavalcato il cui uso preveda normali affollamenti, senza funzioni pubbliche e sociali essenziali, la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza e/o enti con limitato valore naturalistico, economico e sociale (strade a viabilità secondaria, corsi d’acqua, laghi, specchi d’acqua marini, etc.)
<b>BASSA</b>	Ente scavalcato con presenza occasionale di persone e privi di valore naturalistico, economico e sociale (discontinuità naturali, depressioni del terreno, etc.)

Si valuta infine il trasporto di merci pericolose che possono produrre danni alle persone e all’ambiente. Questo parametro secondario genera un incremento di esposizione e quindi di classe di attenzione. Si considera un trasporto di merci pericolose occasionale.

Con i dati sopra definiti si definisce la “Classe di Esposizione” risultante mediante il flusso logico espresso in Figura 21. È risultata la classe “Media” di esposizione.

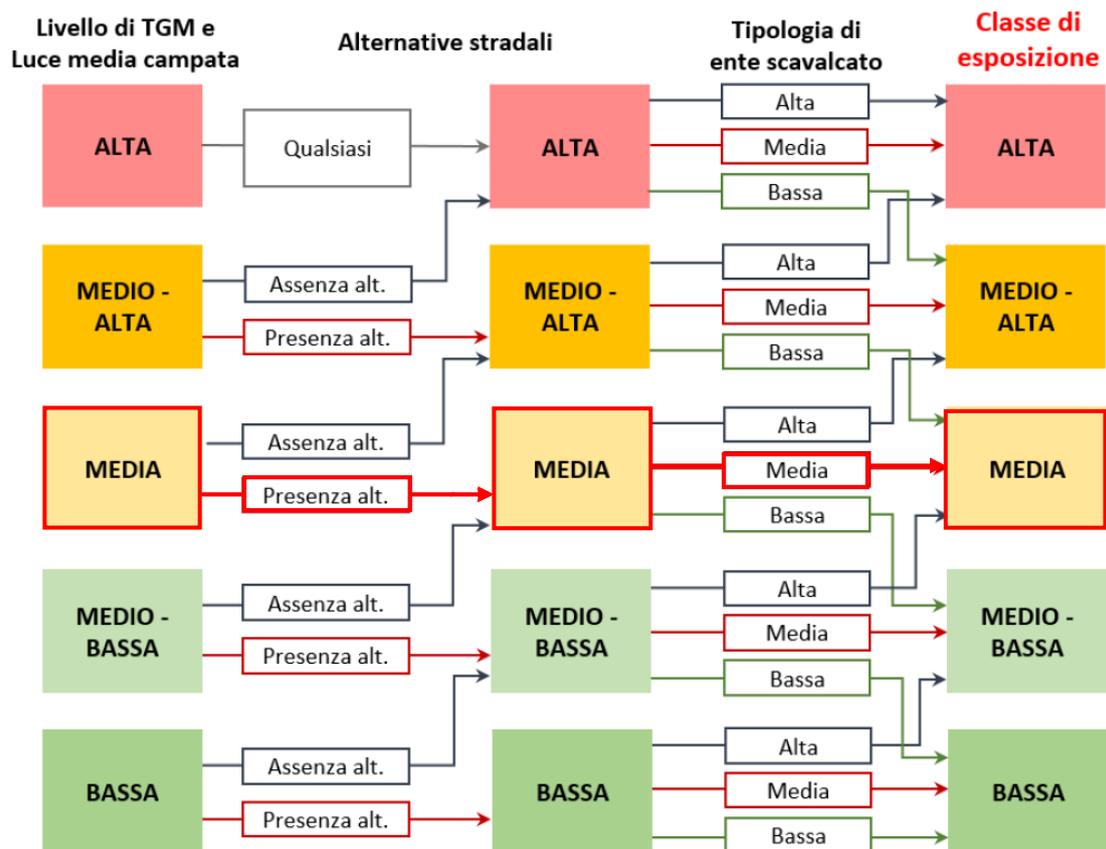


Figura 21: Caso studio 2 – Flusso logico per la definizione della Classe di Esposizione

d. Definizione della “Classe di attenzione strutturale e fondazionale”

Si procede infine con la definizione della “Classe di attenzione strutturale e fondazionale” sfruttando la Tabella 35. I risultati ottenuti per le precedenti classi sono:

- Classe di Pericolosità: Alta;
- Classe di Vulnerabilità: Medio-Bassa;
- Classe di Esposizione: Media.

Tabella 34: Caso studio 2 – Estratto della Tabella 4.10. delle Linee Guida per la determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale

**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	

La “Classe di Attenzione strutturale e fondazionale” ottenuta tramite flussi e operatori logici è risultata essere “Media”. Si rimanda al confronto tra casi studio per maggiori dettagli.

### **6.3. Confronto tra casi studio**

In entrambi i casi studio, nonostante la marcata diversità in termini di degrado presente, la “Classe di Attenzione strutturale e fondazionale” ottenuta è “Media”.

Questa deve essere poi combinata con la “Classe di Attenzione Sismica”, “Idraulica” e di “Rischio frane” al fine di definire la “Classe di Attenzione Complessiva” dei ponti, necessaria per guidare la programmazione delle future attività previste dalle Linee Guida.

L’applicazione delle Linee Guida si è dimostrata celere nonostante vengano considerati un numero considerevole di parametri principali e secondari. I primi, come si è potuto notare in fase valutativa, hanno un peso maggiore sulla definizione delle classi di “Pericolosità”, “Vulnerabilità” ed “Esposizione” dell’opera rispetto ai secondari.

Il degrado presente e rilevato tramite ispezione visiva ha un ruolo decisivo nella definizione della “Classe di Vulnerabilità”, in quanto è il parametro di partenza da cui applicare i percorsi e i flussi logici. Gli ulteriori parametri possono variare, anche in modo significativo, la valutazione finale, come visibile nei casi sopra dimostrati.

Il primo caso studio si presenta in uno stato di conservazione generale peggiore rispetto al secondo caso studio, dovuto principalmente alla vetustà dell’opera. Non si riportano gravi difetti che possano compromettere la struttura delle due opere. Per quanto riguarda la pavimentazione stradale, il primo caso studio presenta nuovamente una condizione lievemente peggiore rispetto al secondo. È da sottolineare che i difetti rilevati hanno bassa rilevanza in tutti e due i casi.

Come specificato nel Capitolo 4, la mancata o limitata conoscenza dei parametri necessari nella valutazione è compensata dall’assunzione delle classi a favore di sicurezza, aumentando di conseguenza la classe di rischio finale e pregiudicando l’impiego del ponte.



## Capitolo 7: Conclusioni

L'elaborato di tesi discute l'attuale tema della gestione delle infrastrutture stradali e ferroviarie. A sostegno delle metodologie tradizionali di ispezione visiva e quantificazione effettiva del degrado vi sono appositi strumenti digitalizzati, i BMS, che permettono all'ente gestore di provvedere ad una corretta e completa gestione dell'opera. Vari sono i metodi impiegati per la quantificazione del degrado per garantire la longevità delle strutture programmandone gli interventi di manutenzione. Le "Linee Guida per i Ponti Esistenti", come ogni metodo discusso, presenta dei pro e dei contro che assicurano un approccio a favore di sicurezza per tutelare l'opera in sé e gli usufruttori di essa.

In particolare, applicando le Linee Guida, si sono valutati due casi studio di ponti stradali con materiali, struttura ed età significativamente diversi, ottenendo come risultato la medesima "Classe di Rischio strutturale e fondazionale". Chiaramente, pur essendosi svolta una valutazione parziale su tali ponti, l'applicazione dell'approccio multilivello si è rivelata celere e pratico.

Particolare attenzione è stata posta alla pavimentazione stradale e al suo impatto sulla valutazione. Le Linee Guida, infatti, non propongono uno studio approfondito della pavimentazione stradale, né in termini prestazionali con valori di riferimento per la definizione del degrado, né in termini operativi per procedere alla rilevazione di dati in modo strumentale. Non sono considerate, inoltre, le tecnologie moderne a sostegno e protezione dell'impalcato e della pavimentazione effettiva.

L'identificazione del degrado e dei difetti presenti sulle opere si rivela essere il punto di partenza non solo per la determinazione delle "Classi di Attenzione" e quindi per determinare il livello di rischio a cui è sottoposta l'opera, ma a garantire che a questa siano garantiti tutti i provvedimenti necessari per adempiere alle proprie funzioni.



# Bibliografia

- (s.d.). Tratto da Google Maps: <https://www.google.com/maps>
- Agenda Tecnica. (2022, 10 03). *Agenda Tecnica informazione tecnico scientifica*. Tratto da [agendatecnica.it](https://www.agendatecnica.it): <https://www.agendatecnica.it/wp/2022/il-nuovo-sistema-di-gestione-della-sicurezza-di-ponti-e-gallerie/>
- AINOP. (s.d.). *AASHTOWare BRIDGE*. Tratto da [www.aashtowarebridge.com](http://www.aashtowarebridge.com): <https://www.aashtowarebridge.com/>
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO. (2001). *A POLICY ON GEOMETRIC DESIGN OF HIGHWAYS AND STREETS*.
- ANAS. (2024, 07 02). *ANAS GRUPPO FS ITALIANE*. Tratto da [www.stradeanas.it](http://www.stradeanas.it): <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/la-rete-anas>
- Andreose, F., Faleschini, F., Michele, F., Mancassola, L., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2019, 10 18). *La gestione della manutenzione di ponti e viadotti tramite Bridge Management System con approccio bottom-up*. Ingenio. Tratto da [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it): <https://www.ingenio-web.it/articoli/la-gestione-della-manutenzione-di-ponti-e-viadotti-tramite-bridge-management-system-con-approccio-bottom-up/>
- Baratono, P., Cosentino, A., Puggetti, S., Renzi, E., & Salvatore, W. (2020, 05 12). *Le nuove Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*. Ingenio. Tratto da <https://www.ingenio-web.it/articoli/analisi-delle-linee-guida-per-la-classificazione-e-gestione-del-rischio-la-valutazione-della-sicurezza-dei-ponti/>
- Barocci, A. (2022, 07 14). *EdilTecnico*. Tratto da [ediltecnico.it](http://ediltecnico.it): <https://ediltecnico.it/catasto-ponti-esistenti-linee-guida/>
- BridgeArt.net*. (s.d.). Tratto da [www.bridgeart.net](http://www.bridgeart.net): <https://www.bridgeart.net/software/programs/danbro-plus>
- Brunetti, A. (2020/2021). *Valutazione della sicurezza dei ponti esistenti: verifiche approfondite degli impalcati in c.a.p. a cavi post-tesi*. Università Politecnica delle Marche.
- Calò, F., & Belletti, M. C. (2022, 11 11). *Indagini su Ponti e Viadotti: dall'ispezione visiva, alle indagini sui materiali fino alle prove di carico*. Ingenio. Tratto da [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it): <https://www.ingenio-web.it/articoli/indagini-su-ponti-e-viadotti-dall-ispezione-visiva-alle-indagini-sui-materiali-fino-alle-prove-di-carico/>
- Cester, N. (2013/2014). *Tesi di Laurea Magistrale: Valutazione della progressione del degrado in ponti e viadotti in calcestruzzo armato*. Padova: Università degli Studi di Padova.

- Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, S. d. (2024, 05 24). Convegno: Il rischio e la fragilità delle infrastrutture ferroviarie strategiche. Linee guida, modelli, metodi di analisi, soluzioni e casi studio. Padova, Italia.
- Colona, G. (2020/2021). *Tesi di Laurea Magistrale : Rating dei ponti stradali; Proposta di rating con approccio prestazionale*. Torino: Politecnico di Torino.
- Condoleo, A. (2011/2012). *Tesi di Laurea Magistrale : Ponti integrali: Analisi statica e sismica*. Padova: Università degli Studi di Padova.
- Consorzio Fabre. (2023, 06 26). *Consorzio Fabre*. Tratto da [www.consorziofabre.it](http://www.consorziofabre.it): <https://www.consorziofabre.it/notizie/ponti-ferroviari-firmato-accordo-tra-ansfisa-rfi-e-consorzio-fabre/>
- Consorzio Fabre. (s.d.). *Consorzio Fabre*. Tratto da [www.consorziofabre.it](http://www.consorziofabre.it): <https://eventi.consorziofabre.it/>
- Dari, A. (2022, 08 27). In *GU le Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza dei ponti*. Ingenio. Tratto da [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it): <https://www.ingenio-web.it/articoli/in-gu-le-linee-guida-per-la-classificazione-e-gestione-del-rischio-la-valutazione-della-sicurezza-dei-ponti/>
- FLYABILITY. (2022). *FLYABILITY*. Tratto da [www.flyability.com](http://www.flyability.com): <https://www.flyability.com/blog/bridge-inspections>
- Francchetti, P., Frizzarin, M., & Leonardi, A. (2020, 04 03). *Ponti italiani: la parola ai gestori delle reti stradali*. Ingenio. Tratto da [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it): <https://www.ingenio-web.it/articoli/ponti-italiani-la-parola-ai-gestori-delle-reti-stradali/>
- Haardt, P. (s.d.). *The German approach to bridge management: from reactive to predictive management procedures*. Federal Highway Research Institute (BAST), Germany.
- Il Gazzettino. (2018, 09 02). *Il Gazzettino.it*. Tratto da [www.ilgazzettino.it](http://www.ilgazzettino.it): [https://www.ilgazzettino.it/pay/padova\\_pay/allarme\\_anche\\_a\\_loreggia\\_segna\\_di\\_deterioramento-3947662.html](https://www.ilgazzettino.it/pay/padova_pay/allarme_anche_a_loreggia_segna_di_deterioramento-3947662.html)
- KIRETI . (2019, 02 26). Tratto da [www.kireti.it](http://www.kireti.it): <https://www.kireti.it/competenza-della-rete-stradale-quantanti-sono-i-ponti-in-italia-e-chi-deve-occuparsene/>
- Marchini, G. (2020/2021). *Tesi di Laurea Magistrale: La verifica accurata di un ponte a cassone a cavi post-tesi*. Università Politecnica delle Marche.
- Martinello, S. (2020, 01). *Analisi critica dei metodi di valutazione numerica dello stato di degrado dei ponti*. Tratto da [www.cias-italia.it](http://www.cias-italia.it): <https://www.cias-italia.it/uploads/Analisi%20critica%20dei%20metodi%20di%20valutazione%20numerica%20dei%20ponti.pdf>

- Martinello, S. (s.d.). *DALLA VALUTAZIONE NUMERICA DELLO STATO DI DEGRADO*. Bolzano. Tratto da <https://www.cias-italia.it/uploads/113.pdf>
- Massa, G. (2019/2020). *Tesi di Laurea Magistrale : La verifica di sicurezza dei ponti esistenti*. Università Politecnica delle Marche.
- Menta, C. (2022, 03 30). *Esami visivi ed ispezioni di strutture in c.a. e carpenteria metallica attraverso droni*. Ingenio. Tratto da [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it): <https://www.ingenio-web.it/articoli/esami-visivi-ed-ispezioni-di-strutture-in-c-a-e-carpenteria-metallica-attraverso-droni/>
- Officials, American Association of State Highway and Transportation. (2016). *AASHTO*. Tratto da <https://downloads.transportation.org/SCOH-16-07%20Movable%20Bridge/CH02.1-2.4.pdf>
- Pefano, R. (2021, 01 25). *Gestione dei ponti esistenti: il quadro normativo italiano e il confronto con alcune normative internazionali*. Ingenio. Tratto da [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it): <https://www.ingenio-web.it/articoli/gestione-dei-ponti-esistenti-il-quadro-normativo-italiano-e-il-confronto-con-alcune-normative-internazionali/>
- Petrangeli, M. P. (2001). *Progettazione e costruzione di ponti : con cenni di patologia e diagnostica delle opere esistenti*. Milano: CEA.
- Piras, F. (2019). *Tesi di Laurea Magistrale : Tecniche di ispezione e manutenzione dei ponti in calcestruzzo*. Torino: Politecnico di Torino.
- PROPONTI. (s.d.). *PROPONTI*. Tratto da [www.proponti.it](http://www.proponti.it): <https://www.proponti.it/>
- Redazione Tecnica. (2023, 05 11). *BibLus*. Tratto da <https://biblus.acca.it/>: <https://biblus.acca.it/bridge-management-system/>
- Redazione Tecnica. (2023, 05 18). *BibLus*. Tratto da <https://biblus.acca.it/>: <https://biblus.acca.it/gestione-infrastrutture-esistenti-linee-guida-ponti/>
- Regione del Veneto. (2023). *Comunicato n° 488*. Venezia. Tratto da <https://www.regione.veneto.it/article-detail?articleId=13783083>
- RFI. (s.d.). *CAPITOLATO GENERALE TECNICO DI APPALTO DELLE OPERE CIVILI PARTE I*. RFI.
- RFI. (s.d.). *CAPITOLATO GENERALE TECNICO DI APPALTO DELLE OPERE CIVILI PARTE II - SEZIONE 17 PIETRISCO PER MASSICCIATA FERROVIARIA*. RFI.
- RFI. (s.d.). *MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI PARTE II - SEZIONE 2 PONTI E STRUTTURE*. RFI.
- RFI. (s.d.). *RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA*. Tratto da [www.rfi.it/it](http://www.rfi.it/it): <https://www.rfi.it/it/rete/la-rete-oggi.html>

- RFI. (s.d.). *RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA*. Tratto da [www.rfi.it/it: https://www.rfi.it/it/Sicurezza-e-tecnologie/Infrastruttura-resiliente/Sicurezza-e-diagnostica-opere-d-arte.html](https://www.rfi.it/it/Sicurezza-e-tecnologie/Infrastruttura-resiliente/Sicurezza-e-diagnostica-opere-d-arte.html)
- Salvatore, W., & Consentino, A. (2020). *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti, Parte 1*.
- Sapienza, P. (s.d.). *Tesi di Dottorato di Ricerca: Un sistema di supporto alle decisioni per la gestione della manutenzione dei ponti di una rete viaria*. Università degli Studi di Catania.
- Scarpato, F. (2020/2021). *Tesi di Laurea Magistrale : Analisi funzionale delle Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti, confronto con procedure analoghe, introduzione di metodologie avanzate di ispezione e implementazione UML*. Torino: Politecnico di Torino.
- Tisalvi, M., & Vecchi, A. (2019). *Ispezione e manutenzione per la durabilità dei ponti: criteri di gestione, contesto normativo, metodi di intervento*. Milano: RFI.
- Tocchetti, A., De Riso, V., & Mennitti, F. (2008). *Infrastrutture ferroviarie*. Roma: Aracne.

