



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea dicembre 2021

**Ispezioni visive e intelligenza
artificiale: modelli dinamici
spazio di stato per la
valutazione del degrado dei
ponti esistenti in accordo con le
Linee Guida**

Relatore:
Prof. Giuseppe Carlo Marano

Candidato:
Giuseppe Maurantonio

Correlatrice:
Dott. Ing. Rebecca Asso

Ai miei nonni

Abstract

In Italia, negli ultimi anni, una tematica particolarmente rilevante riguarda il degrado delle infrastrutture stradali che, di recente, ha causato crolli improvvisi e fragili, con conseguenze sia in termini di viabilità che, soprattutto, di vite umane. In questa situazione di urgenza, il 17 aprile 2020 l'Assemblea generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha approvato le nuove "Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti", attraverso le quali vengono definite in maniera unitaria e senza potere discrezionale le modalità di realizzazione e gestione del sistema di monitoraggio delle infrastrutture stradali. Infatti, l'approccio utilizzato è definito multilivello poiché partendo dal semplice censimento delle opere da analizzare, seguendo cinque livelli ben definiti, si arriva alla determinazione di una classe di attenzione (CdA) mediante cui verranno condotte le verifiche di sicurezza.

Le informazioni sulle quali si basa il sistema di gestione delle infrastrutture consistono nei risultati delle ispezioni visive che permettono di assegnare la classe di attenzione al ponte esaminato e programmare i successivi interventi. Tuttavia, da un lato le ispezioni visive sono una tecnica molto diffusa e speditiva per stabilire le condizioni dell'opera, dall'altro però presentano una serie di svantaggi dovuti alla soggettività dell'ispezione. Infatti, i risultati delle ispezioni sono affetti da errori sulle misurazioni che comportano una difficoltà nella distinzione tra la condizione reale della struttura e la misura eseguita dall'ispettore.

La tesi si inquadra nell'ambito della classificazione e gestione dei ponti esistenti. In questo contesto, data la rumorosità dei dati delle ispezioni delle infrastrutture stradali, la tesi propone l'applicazione di tecniche di Machine Learning nell'ambito dell'apprendimento non supervisionato agli esiti delle ispezioni visive, al fine di ottenere una previsione del degrado di differenti elementi strutturali del ponte ispezionato. In particolare, l'analisi delle serie temporali dei risultati delle ispezioni visive sarà eseguita implementando un modello dinamico lineare bayesiano su Matlab.

L'obiettivo è valutare attraverso il modello l'incertezza legata agli esiti delle ispezioni in accordo con la condizione reale della struttura e l'incertezza legata alle osservazioni dell'ispettore. Sulla base dei risultati si vuole definire un criterio con il quale programmare la manutenzione ordinaria e straordinaria del ponte in accordo con le Linee Guida, valutando la corretta priorità degli interventi e ottimizzando la scelta per gli elementi che necessitano un intervento urgente.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare, innanzitutto, il mio relatore, Prof. Giuseppe Carlo Marano, per avermi coinvolto con sincero entusiasmo in questo lavoro di tesi e, soprattutto, per avermi dato la possibilità di approfondire un tema particolarmente attuale quale il Machine Learning e la gestione dei ponti. Un immenso ringraziamento va fatto anche alla mia correlatrice Rebecca per il suo costante supporto e i suoi preziosi consigli.

Alla fine di questi due anni intensi vorrei ringraziare i miei compagni di viaggio con i quali ho superato tutte le sfide che si sono presentate durante il percorso. Ringrazio infinitamente Giulio, Fabio, Giulia e Antonio per aver condiviso con me la meravigliosa esperienza di fare progetti insieme, notte e giorno, in qualsiasi situazione. Sono grato di aver trovato delle persone così disponibili e preparate. Ho imparato molto da voi.

Vorrei ringraziare con tanto affetto Antonella e Agnese per tutto quello che abbiamo condiviso durante questi anni. Quanta strada abbiamo percorso da quando ci siamo conosciuti il primo giorno al Politecnico e tutto ci sembrava in salita (non avevamo ancora visto nulla). Non immaginavo che avrei incontrato delle persone splendide come voi e non avrei potuto desiderare di meglio. Vi sarò sempre grato per avermi regalato dei ricordi indelebili durante questi due anni.

Last but not least, voglio ringraziare infinitamente Francesco con il quale ho avuto la fortuna di condividere tutto durante questi cinque anni di università, da quando nell'ormai lontano 2016 varcavamo il portone di Palazzo Ducale a Modena. Siamo arrivati insieme alla tanto agognata fine. Se dovessi raccontare tutte le esperienze e tutti i momenti che abbiamo vissuto insieme, potrei pubblicare un libro tragicomico che diventerebbe sicuramente un best seller nel giro di pochi giorni. Scherzi a parte, ti sono grato per questo percorso che abbiamo condiviso perché grazie a te ho imparato che da soli si va più veloci ma insieme si va più lontano. Ti auguro il meglio.

Desidero dedicare questo lavoro ai miei nonni e alla loro memoria.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Contesto di riferimento	1
1.2	Scopo.....	2
1.3	Struttura della tesi	2
2	Panoramica delle ispezioni e della gestione dei ponti esistenti in Italia	4
2.1	Introduzione	4
2.2	La gestione dei ponti esistenti in Italia e i crolli più recenti.....	4
2.3	Evoluzione del quadro tecnico – normativo sulla manutenzione dei ponti....	10
2.3.1	Circolare n° 6736/61/AI del 19.07.1967.....	10
2.3.2	Circolare LL.PP n° 34233 del 25.02.1991	11
2.3.3	Norma C.N.R. (Boll. Uff. n° 165/93).....	11
2.3.4	D. M. 14/01/2008 - Circolare n° 617 del 2.02.2009.....	11
2.3.5	Norme tecniche per le costruzioni 2018 e Circolare Applicativa	12
2.4	Le nuove Linee Guida 2020 per la gestione dei ponti esistenti.....	13
2.4.1	Panoramica della struttura delle Linee Guida	14
2.4.2	Descrizione dell’approccio multilivello.....	15
2.5	Conclusioni	30
3	Stato dell’arte dei modelli di degrado nel <i>Bridge Management System</i>	32
3.1	Introduzione	32
3.2	Le principali cause del degrado nei ponti.....	32
3.3	Il sistema di gestione dei ponti definito dalle Linee Guida.....	34
3.3.1	Il sistema di sorveglianza	34
3.3.2	I metodi di valutazione del degrado per la manutenzione dei ponti.....	38
3.3.3	Gli indicatori numerici del degrado secondo le Linee Guida.....	42
3.3.4	Gli esiti delle ispezioni visive e il BMS.....	44
3.4	<i>Bridge Management System</i> (BMS) e modelli di previsione del degrado	44
3.4.1	Caratteristiche dei sistemi di gestione dei ponti.....	45
3.4.2	Panoramica dei sistemi di gestione dei ponti adottati dai vari Stati.....	46
3.4.3	I modelli di previsione del degrado nei BMS	49
3.5	Limitazioni del processo markoviano e dei metodi di regressione	50
3.5.1	La catena di Markov per prevedere l’andamento del degrado	50
3.5.2	I metodi di regressione per prevedere l’andamento del degrado.....	53
3.5.3	Svantaggi e limitazioni.....	54

3.6	Conclusioni	55
4	Basi teoriche del <i>Machine Learning</i> per i modelli di degrado.....	56
4.1	Introduzione	56
4.2	Approccio bayesiano al <i>Machine Learning</i>	56
4.2.1	Definizione probabilistica del <i>Machine Learning</i>	56
4.2.2	La probabilità bayesiana e il <i>Machine Learning</i>	58
4.3	<i>Space-State Model</i> (SSM): i modelli spazio di stato.....	61
4.4	<i>Linear Gaussian SSM</i> (LG-SSM): i modelli spazio di stato lineari gaussiani.....	63
4.4.1	Configurazione di base e notazioni	63
4.4.2	Formulazione generale del LG – SSM.....	66
4.4.3	Stima dei parametri del modello	68
4.4.4	L’algoritmo di ottimizzazione di Newton-Raphson.....	69
4.5	Forecasting e Smoothing (RTS-KF)	71
4.6	<i>Switching Kalman Filter</i> (SKF): modelli SSM in regime variabile.....	73
4.7	Componenti dei modelli lineari spazio di stato	76
4.8	Conclusioni	78
5	Applicazione del <i>ML</i> ai dati sintetici delle ispezioni visive	79
5.1	Introduzione	79
5.2	OpenBDLM	80
5.3	Metodica.....	83
5.3.1	Dati di input e parametri del modello	83
5.3.2	Generazione dei dati sintetici delle ispezioni visive	85
5.3.3	Scelta dei parametri e processamento dei dati	88
5.3.4	Dati di output	89
5.3.5	Aggiornamento della CdA e costruzione della carta di controllo	90
5.3.6	La teoria dell’utilità attesa per la performance dell’opera	90
5.4	Discussione dei risultati	91
5.4.1	Potenzialità e vantaggi del <i>ML</i> applicato alle ispezioni visive.....	91
5.4.2	Stima della performance dell’elemento.....	93
5.4.3	Stima della performance dell’opera	100
5.5	Conclusioni	104
6	Conclusioni	106
	Bibliografia	108

Indice delle figure

Figura 1.1: Testata de “La Stampa” a seguito del crollo nel 1967 di una campata del Ponte Ariccia.....	1
Figura 2.1: Illustrazione del concetto di resilienza [10].....	5
Figura 2.2: Crollo del viadotto Verdura nel 2013 [11]	6
Figura 2.3: Crollo del ponte sul torrente Sturia [12].....	6
Figura 2.4: Crollo del ponte sulla provinciale 38.....	6
Figura 2.5: Crollo del ponte sulla statale 626 tra Ravanusa e Licata	7
Figura 2.6: Crollo del viadotto Himera [12]	7
Figura 2.7: Crollo del ponte sulla statale Palermo – Sciacca [12]	7
Figura 2.8: Crollo del cavalcavia sulla statale Milano – Lecco [12].....	8
Figura 2.9: Crollo del cavalcavia sulla A14 all’altezza di Camerino [12].....	8
Figura 2.10: Crollo del cavalcavia sulla tangenziale di Fossano [12].....	8
Figura 2.11: Crollo del ponte Morandi [12].....	9
Figura 2.12: Crollo del cavalcavia su un tratto dell’autostrada A6 lungo la Torino-Savona [13].....	9
Figura 2.13: Crollo del ponte di Albiano Magra [12]	9
Figura 2.14: Timeline dell’evoluzione del quadro tecnico – normativo sulla manutenzione dei ponti in Italia	10
Figura 2.15: Diagramma di flusso dell’approccio multilivello proposto dalle Linee Guida [3].....	14
Figura 2.16: Prima pagina della scheda di censimento dei ponti (Allegato A – Linee Guida)[3].....	15
Figura 2.17: Scheda di difettosità dell’opera (Allegato B – Linee Guida) [3].....	17
Figura 2.18: Prima pagina della scheda descrittiva di ispezione (Allegato B – Linee Guida) [3].....	17
Figura 2.19: Pagina tratta dalla scheda “Frane e alluvioni” (Allegato B – Linee Guida) [3]	18
Figura 2.20: Pagina tratta dalla “Scheda di ispezione speciale” (Allegato D – Linee Guida) [3].....	19
Figura 2.21: Diagramma di flusso per valutare la Classe di Attenzione [3]	20
Figura 2.22: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione strutturale e fondazionale [3].....	21

Figura 2.23: Determinazione della classe di vulnerabilità strutturale e fondazionale [3].	21
Figura 2.24: Determinazione della classe di esposizione strutturale e fondazionale [3].	22
Figura 2.25: Determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale [3].	23
Figura 2.26: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione per il rischio sismico [3].	24
Figura 2.27: Determinazione della classe di pericolosità sismica [3].	24
Figura 2.28: Determinazione della classe di vulnerabilità sismica [3].	25
Figura 2.29: Determinazione della classe di esposizione sismica[3].	25
Figura 2.30: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione per il rischio frane [3].	26
Figura 2.31: Determinazione della classe di suscettibilità per rischio frane [3].	26
Figura 2.32: Determinazione della classe di vulnerabilità per rischio frane [3].	27
Figura 2.33: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione per il rischio idraulico [3].	27
Figura 2.34: Determinazione della classe di attenzione complessiva del ponte esistente [3].	29
Figura 3.1: Esempio di fenomeni di degrado in un graticcio [20].	33
Figura 3.2: Visione ravvicinata di cavi da pretensione corrosi [20].	33
Figura 3.3: Relazione tra i livelli di analisi dell'approccio multilivello.	34
Figura 3.4: Strategia "risk-based": tipologia delle attività di sorveglianza da svolgere in funzione della CdA.	35
Figura 3.5: Frequenza minima delle ispezioni ordinarie [3].	36
Figura 3.6: Ispezione straordinaria di una pila tramite discesa in corda doppia [20].	37
Figura 3.7: Prove di carico sui ponti.	37
Figura 3.8: Esempio di sensori accelerometrici per il monitoraggio strumentale.	38
Figura 3.9: Analisi da svolgere per l'assegnazione del voto [8].	39
Figura 3.10: Esempio di una scheda di descrizione del difetto (MVN) [5].	40
Figura 3.11: Scheda di valutazione numerica dello stato di degrado del ponte (MVN) [5].	41
Figura 3.12: Soglie di attenzione e di allarme [3].	43
Figura 3.13: Classi di Attenzione in funzione dello stato di condizione [3].	44
Figura 3.14: Componenti del Bridge Management System [23].	45
Figura 3.15: Componenti del BMS americano "Pontis".	47
Figura 3.16: BMS della Provincia autonoma di Trento[25].	48

Figura 3.17: Homepage piattaforma weBridge [22].	49
Figura 3.18: Processo qualitativo di degrado nel tempo di un ponte.	49
Figura 3.19: Modello deterministico per la curva di degrado proposta dalla norma UNI EN 16991:2018 e citata dalle Linee Guida [28].	50
Figura 3.20: Stati del modello markoviano con le possibili transizioni nel modello di degrado rappresentate dalle frecce [6].	51
Figura 3.21: Backward Prediction Model (BPM) proposto da Lee et al. [37].	54
Figura 4.1: Paragone tra le tecniche di apprendimento del comportamento da un dataset con e senza l'utilizzo del ML [43].	57
Figura 4.2: Diagramma di Venn [43].	59
Figura 4.3: La stazionarietà delle serie temporali [43].	61
Figura 4.4: Esempio del moto del proiettile [43].	62
Figura 4.5 rappresentazione grafica del calcolo della densità di probabilità a posteriori [43].	66
Figura 4.6: Annullamento della derivata della funzione verosimiglianza (algoritmi MLE) [43].	69
Figura 4.7: Esempio di Newton-Raphson applicato alla funzione quadratica [43].	70
Figura 4.8: Risultati delle prime due iterazioni dell'algoritmo [43].	70
Figura 4.9: Filtering, smoothing e forecasting [43].	71
Figura 4.10: Il processo di smoothing [43].	72
Figura 4.11: Paragone tra filtro di Kalman e RTS Kalman filter[43].	73
Figura 4.12: Sistemi ai quali è possibile applicare il modello stato – spazio [43].	73
Figura 4.13: Sistema che presenta un cambiamento di regime al quale non è possibile applicare il modello stato di spazio [43].	73
Figura 4.14: Possibili percorsi di transizione di regime in un sistema ad ogni istante di tempo [51].	74
Figura 4.15: Sistema con cambiamento di regime e unione dei possibili percorsi di transizione ad ogni intervallo di tempo [51].	74
Figura 4.16: Dettaglio dello step di filtraggio del filtro SKF [43].	75
Figura 4.17: Dettaglio dello step di unione del filtro SKF [43].	75
Figura 5.1: Logo OpenBDLM [43].	79
Figura 5.2: Diagramma di flusso generale OpenBDLM [55].	80
Figura 5.3: Esempio di resampling di tre serie temporali [56].	81
Figura 5.4: Componenti definite in fase di costruzione del modello [56].	82

Figura 5.5: Tabella del manuale di riferimento di OpenBDLM con i parametri iniziali del modello [56].....	82
Figura 5.6: Workflow dettagliato sul funzionamento di OpenBDLM [56]	83
Figura 5.7: Esempio di curva di degrado sintetica.....	86
Figura 5.8: Definizione degli errori di osservazione σV	86
Figura 5.9: Osservazioni sintetiche.....	87
Figura 5.10: Esiti sintetici delle ispezioni che verranno processati dal modello	87
Figura 5.11: Costruzione del file .mat compatibile con OpenBDLM.....	88
Figura 5.12: Serie temporale dal 1985 al 2050 con dati sintetici generati fino al 2011....	92
Figura 5.13: Aggiornamento del dataset con quattro nuove osservazioni dal 2013 al 2019	92
Figura 5.14: Confronto tra l'andamento dell'indice di performance predetto dal modello aggiornato con la nuova osservazione nel 2013 (sopra) e nel 2019 (sotto)	93
Figura 5.15: Curva dell'IP sintetico.....	95
Figura 5.16: Velocità di cambiamento dell'IP sintetico.....	95
Figura 5.17: Accelerazione dell'IP sintetico.....	96
Figura 5.18: Insieme dei dati sintetici generato per l'elemento "Travi Longitudinali"	96
Figura 5.19: Andamento dell'indice di performance predetto dal modello	97
Figura 5.20: Confronto tra l'andamento dell'indice di performance predetto dal modello (in rosso) e quello sintetico (tratteggiato in nero).....	97
Figura 5.21: Grafico a dispersione della condizione stimata dal modello e quella sintetica	98
Figura 5.22: Carta di controllo dell'elemento "Trave Longitudinale"	99
Figura 5.23: Previsione della Classe di Attenzione dell'elemento "Trave Longitudinale" in termini di Difettosità Relativa DR	99
Figura 5.24: Previsione della Classe di Attenzione dell'elemento "Trave Longitudinale" in termini di Indice di Performance IP (%).....	100
Figura 5.25: Istogramma del numero di elementi in ciascuna CdA per l'anno 2020.....	101
Figura 5.26: Andamento nel tempo del numero di elementi in ciascuna CdA	102
Figura 5.27: Previsione dell'andamento dell' IP_{opera} nel tempo con la teoria dell'utilità attesa	104
Figura 5.28: Diagramma di flusso dei passi seguiti nell'applicazione del modello.....	105

Indice delle tabelle

Tabella 5.1: Elementi sintetici considerati nell'analisi	94
Tabella 5.2: Difettosità relativa e Indice di Performance del primo anno di ispezioni	94
Tabella 5.3: CdA per ogni elemento strutturale determinate nell'anno 2020	100
Tabella 5.4: Percentuale di elementi per ogni CdA e per ogni anno di ispezione.....	102
Tabella 5.5: IP riferito all'opera calcolato con la teoria dell'utilità attesa	103

1 Introduzione

1.1 Contesto di riferimento

Il patrimonio infrastrutturale in Italia è fragile e vetusto. I recenti crolli dei ponti mettono in luce l'avanzato degrado delle opere stradali che sono un elemento critico delle arterie infrastrutturali [1]. Infatti, i danni di un crollo coinvolgono da un lato le vite umane in modo diretto, dall'altro l'intera rete di viabilità con conseguenze in termini economici e di risorse per il ripristino. Pertanto, il patrimonio infrastrutturale deve essere regolarmente ispezionato e correttamente sottoposto a interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Il ritardo negli interventi comporta costi più alti rispetto ad una manutenzione sistematica. Tuttavia, è anche vero che l'Italia possiede un numero considerevole di opere d'arte viarie data l'orografia del territorio e un sistema di trasporto basato sul sistema stradale [1]. Di conseguenza, non è possibile intervenire rapidamente sull'intero insieme di ponti da mantenere. Dunque, data l'urgenza, risulta necessario stabilire un sistema attraverso il quale programmare gli interventi su base prioritaria, andando a definire una gerarchia delle opere che necessitano di manutenzione all'interno della rete infrastrutturale.

Nel nostro Paese, il quadro tecnico – normativo in materia di manutenzione della rete infrastrutturale ha subito numerosi cambiamenti. In generale, l'approccio più diffuso è di tipo emergenziale, ossia si interviene quando la condizione di degrado della struttura è avanzata [2]. I riferimenti normativi più rilevanti, infatti, sono stati emanati a seguito di crolli che hanno generato un grande impatto sull'opinione pubblica e sul contesto politico. Non a caso il primo riferimento normativo è scaturito dal crollo di una campata del Ponte Ariccia nel 1967.



Figura 1.1: Testata de “La Stampa” a seguito del crollo nel 1967 di una campata del Ponte Ariccia

Nel 2020 sono state emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici le nuove Linee Guida per la gestione dei ponti esistenti. Le nuove Linee Guida pongono un approccio multilivello per definire in maniera unitaria e senza potere discrezionale le modalità di realizzazione e gestione del sistema di monitoraggio e gestione delle infrastrutture stradali [3]. In particolare, viene presentato un sistema di sorveglianza *risk – based*, vale a dire che le ispezioni e gli interventi sono pianificati sulla base della Classe di Attenzione che descrive il livello di sicurezza della struttura.

Dunque, le ispezioni visive, ordinarie e straordinarie, sono lo strumento operativo sul quale si fonda la programmazione della manutenzione dei ponti. Le nuove Linee Guida, infatti, indicano all'Ente gestore l'adozione di un sistema di gestione dei ponti, in inglese *Bridge Management System* (BMS). I BMS sono dei sistemi, frequentemente implementati in un software, che permettono l'archiviazione dei dati delle ispezioni, di modellare la previsione del deterioramento, stimare dei costi di manutenzione e, infine, di proporre il modo ottimale di allocazione delle risorse economiche attraverso un modello decisionale [4].

I BMS sono diffusi da ormai qualche decennio a livello internazionale. Anche in Italia, in seguito alla politica di decentramento che ha trasferito le competenze statali sulla gestione dei ponti a Regioni e Province, sono stati sviluppati diversi sistemi per la gestione dei ponti. La normativa ha ripreso il sistema proposto dal CIAS, Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale, basato sul Metodo della Valutazione Numerica che propone un indice per valutare il degrado dell'opera basato sulla difettosità relativa D_R registrata in fase di ispezione visiva [5]. Quindi, attraverso l'andamento nel tempo delle valutazioni degli ispettori è possibile costruire il modello di previsione del degrado adoperato nei software BMS.

1.2 Scopo

Un elemento imprescindibile per il sistema di gestione dei ponti (BMS) è il modello predittivo del degrado dell'opera basato sugli esiti delle ispezioni. Il modello di predizione è realizzato attraverso modelli meccanici, deterministici oppure stocastici, ma il più diffuso nei software BMS è quello stocastico. In letteratura, infatti, numerosi studi sulla previsione del deterioramento riportano l'applicazione di modelli basati sul processo markoviano o sulle regressioni [6]. Tuttavia, sia le catene di Markov che i modelli basati sulle regressioni presentano delle limitazioni se applicati nel peculiare contesto della gestione dei ponti. Gli svantaggi, infatti, sono dovuti all'aleatorietà delle ispezioni visive e all'incertezza epistemica dei fenomeni di degrado [7].

Dunque, lo scopo del presente elaborato di tesi è descrivere un metodo alternativo per costruire le curve di degrado impiegate nei sistemi di gestione dei ponti utilizzando le tecniche di *Machine Learning*. In particolare, si presenterà l'applicazione dei modelli dinamici spazio di stato, in inglese *Space State Model* (SSM), agli esiti delle ispezioni visive per superare alcune limitazioni dei metodi stocastici impiegati allo stato dell'arte attuale per la previsione del deterioramento.

1.3 Struttura della tesi

Nel presente elaborato sarà presentata nel capitolo 2 una panoramica delle ispezioni e della gestione dei ponti esistenti in Italia facendo riferimento ai crolli più recenti e all'evoluzione del quadro tecnico – normativo in materia. Sarà, quindi, approfondita la struttura delle nuove Linee Guida con particolare riferimento all'approccio multilivello.

Nel capitolo 3 verrà presentato il sistema di sorveglianza proposto dalla normativa e, successivamente, verrà analizzato lo stato dell'arte dei modelli di degrado più diffusi nei software BMS, ossia il processo markoviano e i modelli di regressione.

Nel capitolo 4 si descriveranno le tecniche di *machine learning* utilizzate nell'applicazione attraverso un approccio probabilistico bayesiano. In seguito, saranno presentati i modelli spazio di stato (SSM) e le loro estensioni.

Nel capitolo 5 verrà descritta l'applicazione del modello spazio di stato alle ispezioni visive. Si descriverà la metodica con cui è stata condotta l'analisi e si discuteranno i risultati. Infine, si presenteranno le conclusioni sulla base dei risultati ottenuti e si proporranno i possibili sviluppi futuri.

2 Panoramica delle ispezioni e della gestione dei ponti esistenti in Italia

2.1 Introduzione

In Italia, i recenti crolli dei ponti, avvenuti in maniera improvvisa e fragile, mostrano l'importanza di una gestione corretta delle opere stradali da parte degli Enti gestori mediante una consapevole valutazione dello stato di degrado e delle condizioni di sicurezza, che nella maggior parte dei casi viene attuata attraverso le ispezioni visive [8]. L'obiettivo principale per un Ente gestore di un'infrastruttura, infatti, è da un lato mantenere un adeguato livello di sicurezza per gli utenti, dall'altro razionalizzare i costi di gestione ed esercizio dell'infrastruttura [4].

In particolare, per garantire la corretta gestione dei ponti e dei viadotti, il gestore deve:

- garantire la sicurezza strutturale sia in condizioni ordinarie, che in condizioni eccezionali (eventi naturali, o di natura antropica);
- razionalizzare i costi di manutenzione tramite un'adeguata pianificazione degli interventi abbinata a un programma di sorveglianza dello stato di condizione;
- minimizzare l'impatto sulla funzionalità dell'infrastruttura di tali interventi manutentivi [4].

Ciononostante, il patrimonio delle reti infrastrutturali in Italia è fragile e numerosi sono i crolli dei ponti verificatisi a seguito di una non corretta gestione della manutenzione.

Nel presente capitolo si presenterà una panoramica dei crolli più recenti dei ponti esistenti in Italia a seguito di una mancanza di gestione degli interventi di manutenzione. Successivamente, si descriverà l'evoluzione del quadro tecnico – normativo in materia di gestione delle opere stradali a partire dalla Circolare n° 6736/61/AI del 1967 fino ad arrivare alle ultime Linee Guida diramate nel 2020. Infine, nel paragrafo 2.6 saranno proposti i vantaggi e definite le problematiche dell'attuale sistema di gestione dei ponti in Italia.

2.2 La gestione dei ponti esistenti in Italia e i crolli più recenti

Negli anni '60, l'Italia vantava una rete autostradale nuova e all'avanguardia nel contesto internazionale, al contrario dello stato attuale, che in alcuni casi accusa difetti costruttivi o progettuali, ed in altri casi invece sconta un'inadeguata manutenzione [2].

Dalla “Conferenza stampa Ponti: i risultati del monitoraggio delle Province” dell'Unione Province di Italia è risultato che:

- Più di 4.200 infrastrutture tra ponti, viadotti e gallerie sulla rete di Autostrade per l'Italia;

- Più di 30.000 infrastrutture tra ponti, viadotti e gallerie gestite dalle Province nelle regioni a statuto ordinario:
 - 5.931 opere sono già sottoposte all'attenzione delle Province;
 - 1.918 opere necessitano di interventi urgenti;
 - 14.089 sono considerate opere da sottoporre ad indagini tecnico diagnostiche [2].

Per i ponti, in particolare per quelli delle strade di categoria inferiore, non ci sono adeguati piani di manutenzione e le risorse economiche destinate agli interventi sono scarse: dal 2009 al 2017, infatti, si registra una diminuzione del 51% dei finanziamenti statali alle Province per la sicurezza delle strutture [2].

A causa della mancanza di manutenzione si sono registrati numerosi crolli nel corso degli ultimi anni con conseguenze sia in termini di vite umane che in termini di viabilità e risorse economiche. Molto spesso, infatti, i danni indiretti, ossia i danni al sistema infrastrutturale e al suo ripristino, non sempre sono trascurabili e possono rivelarsi a breve o a lungo termine, in funzione della resilienza del sistema infrastrutturale e dell'efficienza delle misure adottate a seguito dell'evento catastrofico [2]. La resilienza delle reti infrastrutturali è valutata sulla base delle seguenti caratteristiche:

- Robustezza: capacità di fronteggiare eventi disastrosi e offrire un certo livello di servizio a seguito dell'evento;
- Rapidità: velocità di recupero della funzionalità dopo l'evento disastroso;
- Ridondanza: risorse/percorsi alternativi;
- Capacità di recupero: risorse a disposizione per il recupero delle funzionalità [9].

Nella seguente figura è mostrata la relazione tra questi quattro fattori in termine di performance della rete infrastrutturale nel tempo [10].

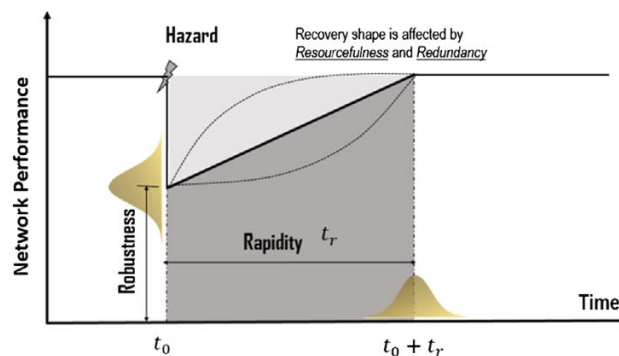


Figura 2.1: Illustrazione del concetto di resilienza [10]

Di seguito si riporta una panoramica dei crolli più importanti dal 2013 al più recente nel 2020 sottolineando le conseguenze dirette sulle vite umane e indirette sulla viabilità e sul ripristino provocate dal crollo [2].



Figura 2.2: Crollo del viadotto Verdura nel 2013 [11]

Il 2 febbraio 2013 una porzione del viadotto Verdura lungo la statale 115 che collega Agrigento a Trapani (unica via di collegamento principale) è crollata. Non si sono riportati danni diretti a persone. Tuttavia, ci sono stati danni indiretti alla circolazione a causa di una deviazione su strade secondarie e un allungamento del percorso di quasi 45 km [2], [11].



Figura 2.3: Crollo del ponte sul torrente Sturia [12]

Il 22 ottobre 2013 si è verificato il crollo di un ponte sul torrente Sturia (Liguria) a seguito di un evento di piena del torrente durante l'alluvione in Val Fontanabuona. Ci furono due morti e ingenti perdite economiche per le imprese della zona [2].



Figura 2.4: Crollo del ponte sulla provinciale 38

Un ponte sulla provinciale 38 che collega Olbia a Tempio Pausania (OT – Sardegna) durante un'alluvione è crollato il 18 novembre 2013. Si riportarono danni diretti a persone e danni indiretti. In particolare, ci furono tre morti e il tratto di strada è ancora oggi chiuso al traffico [11].



Figura 2.5: Crollo del ponte sulla statale 626 tra Ravanusa e Licata

Il 7 luglio 2014 si è verificato il crollo di un ponte sulla statale 626 tra Ravanusa e Licata (AG – Sicilia) a causa di un cedimento strutturale. Morirono quattro persone e il traffico fu deviato su strade secondarie allungando significativamente i tempi di percorrenza. Il tratto stradale è stato riaperto nel marzo 2018 [11].



Figura 2.6: Crollo del viadotto Himera [12]

Il 10 aprile 2015 si è verificato il cedimento di quattro piloni del viadotto Himera lungo l'autostrada A19 tra Palermo e Catania (Sicilia) e conseguente accostamento della carreggiata su quella in direzione opposta [2]. I danni diretti a persone non ci furono. Tuttavia, a seguito del cedimento vi fu la chiusura del tratto autostradale e deviazione del traffico con la conseguente necessità di demolire entrambe le carreggiate per un tratto di 270 m.



Figura 2.7: Crollo del ponte sulla statale Palermo – Sciacca [12]

Un pilone del ponte sulla statale Palermo – Sciacca (Sicilia) subì un leggero cedimento probabilmente dovuto alla costruzione di un manufatto nei pressi del pilone il 29 novembre 2015 [2]. Si registrarono due morti. Il tratto stradale di 5 km fu chiuso per qualche ora.



Figura 2.8: Crollo del cavalcavia sulla statale Milano – Lecco [12]

Il 28 ottobre 2016 si verificò un crollo di un cavalcavia sulla statale Milano – Lecco (Lombardia) durante il passaggio di un tir di 108 tonnellate [11]. Vi furono un morto e diversi feriti. Il traffico fu deviato su strade secondarie allungando significativamente i tempi di percorrenza.



Figura 2.9: Crollo del cavalcavia sulla A14 all'altezza di Camerino [12]

Il 9 marzo 2017 un cavalcavia sulla A14 all'altezza di Camerino (AN – Marche) crollò [11]. Il crollo interessò una struttura provvisoria a sostegno del cavalcavia chiusa al traffico, ed avvenne in occasione dei lavori autostradali per ampliamento del numero di corsie. Si riportarono danni diretti a persone: in particolare ci furono due morti e tre feriti. Il traffico fu deviato su strade secondarie allungando significativamente i tempi di percorrenza [2].



Figura 2.10: Crollo del cavalcavia sulla tangenziale di Fossano [12]

Il 19 aprile 2017 si verificò il crollo di un cavalcavia sulla tangenziale di Fossano (CN – Piemonte) [2]. Non ci furono danni diretti a persone. Tuttavia, a seguito della deviazione del traffico, ci fu un allungamento significativo dei tempi di percorrenza. Cavalcavia non è ancora ripristinato e le carreggiate adiacenti non consentono il passaggio di mezzi pesanti.



Figura 2.11: Crollo del ponte Morandi [12]

14 agosto 2018 crollò il ponte Morandi (GE- Liguria). Ci furono 43 morti e numerosi danni alla circolazione nel tratto autostradale in quanto il traffico fu deviato nella città di Genova. Ci furono danni economici a 1432 aziende situate nella zona del crollo e circa 300 famiglie furono sfollate [11].



Figura 2.12: Crollo del cavalcavia su un tratto dell'autostrada A6 lungo la Torino-Savona [13]



Figura 2.13: Crollo del ponte di Albiano Magra [12]

Il due crolli più recenti sono avvenuti il 24 novembre 2019 su un tratto dell'autostrada A6 lungo la Torino-Savona che è ceduto a causa di una frana, e il crollo del ponte di Albiano Magra il 20 aprile 2020 [11]. I casi non hanno riportato danni in termini di vite umane ma vi furono comunque danni indiretti.

Come mostrato nella panoramica generale, il crollo dei ponti, che va via via aumentando a causa dei processi degenerativi a cui sono sottoposti i materiali nel tempo, o ancora agli eventi eccezionali come sismi e alluvioni, evidenzia la necessità da parte degli enti gestori di attuare un sistema di sorveglianza adeguato e costante delle opere d'arte a cui dovrebbe seguire la successiva programmazione degli interventi di manutenzione, per i ponti in esercizio [14].

2.3 Evoluzione del quadro tecnico – normativo sulla manutenzione dei ponti

In Italia, la sorveglianza delle opere d'arte iniziò verso la fine degli anni '60 a seguito del crollo nel 1967 di una campata del Ponte Ariccia sulla via Appia presso Roma causata dal cedimento di un pilone [14].

Il primo provvedimento emanato a seguito di tale crollo è la circolare N. 6736/61A1 del 1967. Successivamente, negli anni seguenti vengono emanati ulteriori circolari e decreti per regolamentare le modalità di manutenzione delle opere stradali. Di seguito si presentano le principali fonti che hanno segnato l'evoluzione del quadro tecnico – normativo in materia di gestione dei ponti.

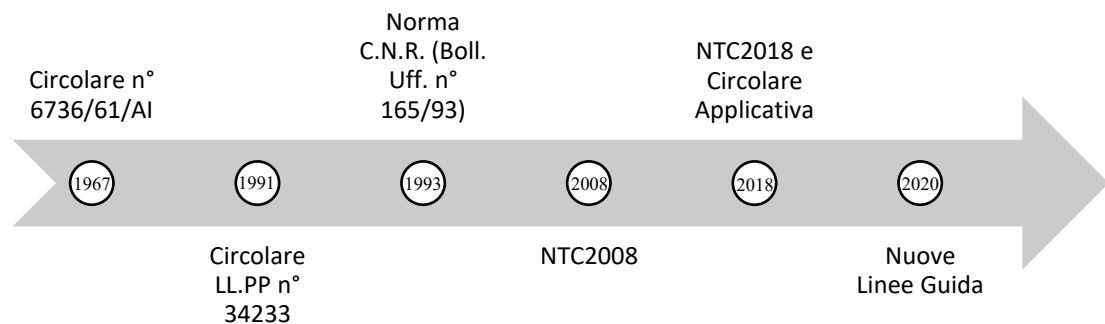


Figura 2.14: Timeline dell'evoluzione del quadro tecnico – normativo sulla manutenzione dei ponti in Italia

2.3.1 Circolare n° 6736/61/AI del 19.07.1967

La circolare è stata emanata nel 1967 dal Ministero dei Lavori Pubblici si inquadra nell'ambito del "Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali". Rappresenta anche un punto di riferimento per le normative di Paesi esteri, come Austria e Germania, i quali seguono le linee di tale circolare.

Nella Circolare, sono stabilite le regole per l'ispezione delle strutture mettendo in evidenza l'importanza di ispezioni accurate e periodiche, della vigilanza assidua del patrimonio di opere d'arte stradali e di conseguenza, delle operazioni di manutenzione e ripristino [15]. Le caratteristiche principali della Circolare sono l'esecuzione di una ispezione trimestrale, eseguita da tecnici, e di un'ispezione annuale eseguita da ingegneri. La Circolare ne illustra le modalità per l'esecuzione e prevede la compilazione di un rapporto d'ispezione e di una scheda con i dati del manufatto e delle sue caratteristiche principali [15].

2.3.2 Circolare LL.PP n° 34233 del 25.02.1991

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 25 febbraio 1991 fornisce i criteri generali di progettazione dei ponti stradali e, in particolare, completa la Circolare del 1967 proponendo un sistema di gestione delle opere stradali.

Secondo la Circolare, le strutture da ponte inserite nella rete stradale nazionale devono presentarsi in permanente stato di agibilità tecnica, con riferimento, ovviamente, alle caratteristiche dei tronchi stradali cui esse sono a servizio [16]. Gli operatori preposti alla gestione delle strade devono avere conoscenza delle opere affidate, sostenuta da adeguata documentazione tecnica contenente tutti i dati salienti relativi al progetto, alla esecuzione, al collaudo, alla gestione. La Circolare stabilisce nel dettaglio le modalità attraverso le quali si esplica la gestione dei ponti stradali:

- vigilanza;
- ispezione;
- manutenzione: ordinaria-straordinaria;
- interventi statici;
- restauro-adequamento-ristrutturazione.

2.3.3 Norma C.N.R. (Boll. Uff. n° 165/93)

La Norma C.N.R. (Boll. Uff. n° 165/93) contiene le istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale ponti e viadotti. Vengono dettagliatamente descritte tutte le fasi del processo manutentivo, con particolare riferimento alla vigilanza, alle ispezioni, alla manutenzione ed agli interventi statici di restauro, adeguamento e ristrutturazione [14].

2.3.4 D. M. 14/01/2008 - Circolare n° 617 del 2.02.2009

Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 sono carenti nella parte riguardante la gestione e la manutenzione dei ponti. Infatti, citano al par. 5.1.7.5 i "Dispositivi per l'ispezionabilità" [17] delle opere senza alcun riferimento alle ispezioni. Il riferimento al rilievo della condizione dell'elemento strutturale è citato soltanto al par. 8.5.2 dove si indica di "tenere presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi" [17].

2.3.5 Norme tecniche per le costruzioni 2018 e Circolare Applicativa

Il capitolo 8 della Circolare Applicativa delle NTC del 2018 riporta indicazioni aggiuntive al capitolo 8 (Costruzioni esistenti) delle Norme Tecniche delle Costruzioni specificatamente riferite ai ponti esistenti.

La principale novità è l'inserimento di una serie di paragrafi che non trovano corrispondenza nel capitolo 8 delle NTC 2018 ma che comunque forniscono indicazioni utili per la valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi dei ponti esistenti.

Nella Circolare, infatti, si definisce l'applicazione ai ponti esistenti della stessa metodologia utilizzata per la valutazione della sicurezza delle costruzioni esistenti alla luce di quanto previsto dalle NTC2018. In particolare, le verifiche di sicurezza comportano l'esecuzione di un'analisi strutturale, di tipo lineare oppure non lineare, e di successive verifiche di resistenza e/o di deformabilità di tutti gli elementi critici dell'opera [18]. Il metodo si basa su cinque step principali:

1. Analisi storico – critica;
2. Analisi dello stato di fatto;
3. Esecuzione delle prove sui materiali;
4. Modellazione ed analisi dell'opera;
5. Esecuzione delle verifiche di sicurezza.

Sulla base delle analisi storiche e dello stato di fatto e delle prove sui materiali si stabilisce il libello di conoscenza della struttura sulla base del quale definire le caratteristiche del modello strutturale dell'opera. Successivamente, si potranno eseguire le verifiche di sicurezza. Gli esiti delle verifiche devono permettere di stabilire quali provvedimenti adottare (intervento locale, miglioramento, adeguamento) affinché l'uso della struttura possa essere conforme ai criteri di sicurezza delle NTC ed alle norme funzionali e di sicurezza dell'esercizio [18].

Tuttavia, da un lato il metodo proposto dalla Circolare Applicativa ha il vantaggio di stabilire la sicurezza del ponte esistente con un'adeguata affidabilità, dall'altro presenta numerosi svantaggi in termini di tempistica e risorse in un'ottica di gestione delle opere stradali.

Infatti, uno dei principali svantaggi risiede nel fatto che la valutazione della sicurezza secondo la circolare richiederebbe un'analisi lunga in termini di tempi di svolgimento poiché è eseguita per ogni singola opera [2]. Per di più, l'esecuzione di prove sperimentali su materiali in laboratorio e in situ richiederebbe costi diversamente ragionevoli e, inoltre, dal punto di vista dell'analisi strutturale il modello del ponte esistente non consente di inserire la presenza di difetti e, dunque, di modellare il suo degrado.

Per tali motivi, l'approccio della Circolare Applicativa non è facilmente applicabile all'intero patrimonio delle opere stradali per definire i provvedimenti da adottare in termini di gestione delle infrastrutture [2]. Inoltre, la pianificazione degli interventi non può basarsi sulla singola opera ma è necessario estendere l'analisi a livello territoriale, stabilendo una lista di priorità di intervento mediante la valutazione del livello di sicurezza associato alla singola opera e della resilienza dell'intera rete infrastrutturale nella quale tale opera è inserita.

2.4 Le nuove Linee Guida 2020 per la gestione dei ponti esistenti

In Italia, l'approccio finora utilizzato per la definizione degli interventi sui ponti esistenti è di tipo emergenziale, ossia si definiscono i provvedimenti da intraprendere per migliorare la sicurezza della struttura solo dopo un evidente stato di degrado di quest'ultima [2]. Inoltre, il contesto tecnico – normativo propone una metodologia onerosa in termini di tempo e risorse per la valutazione della sicurezza e gestione delle opere stradali, per di più omettendo l'inquadramento della struttura analizzata nel network infrastrutturale in cui è inserita.

Pertanto, il 17/04/2020 approvate e adottate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici le "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti". Le nuove Linee Guida propongono un approccio per definire in maniera unitaria e senza potere discrezionale le modalità di realizzazione e gestione del sistema di monitoraggio e gestione delle infrastrutture stradali.

Il documento fornisce ai gestori e ai proprietari dei ponti italiani, gli strumenti necessari per la conoscenza delle opere e per la definizione delle eventuali operazioni di sorveglianza e monitoraggio, di verifica e d'intervento [3]. Infatti, nelle Linee Guida è illustrata la procedura di gestione della sicurezza dei ponti esistenti ai fini di prevenire livelli inadeguati di danno, rendendo accettabile il rischio. Essa è composta da tre parti:

- il censimento e la classificazione del rischio,
- la verifica della sicurezza,
- la sorveglianza e monitoraggio dei ponti e dei viadotti esistenti.

In particolare, l'approccio utilizzato è *multilivello* ossia partendo dal semplice censimento delle opere d'arte da analizzare si arriva alla determinazione di una classe di attenzione sulla base della quale verranno condotte le verifiche di sicurezza. Relativamente alle opere con luce minore di 6.0 m, sarà cura del gestore/proprietario dell'infrastruttura definire le modalità di sorveglianza e monitoraggio, anche in termini di cadenza temporale, in funzione delle specifiche peculiarità delle opere e delle caratteristiche territoriali. L'approccio si sviluppa su sei livelli differenti qui di seguito riportati e ripresi direttamente dal documento[3]:

- Il Livello 0 prevede il censimento di tutte le opere e delle loro caratteristiche principali mediante la raccolta delle informazioni e della documentazione disponibile.
- Il Livello 1, esteso alle opere censite a Livello 0, prevede l'esecuzione di ispezioni visive dirette e il rilievo speditivo della struttura e delle caratteristiche geomorfologiche ed idrauliche dell'area, tese a individuare lo stato di degrado e le principali caratteristiche strutturali e geometriche di tutte le opere, nonché potenziali condizioni di rischio associate a eventi franosi o ad azioni idrodinamiche.
- Il Livello 2 consente di giungere alla classe di attenzione di ogni ponte, sulla base dei parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, determinati elaborando i risultati ottenuti dai livelli precedenti. In funzione di tale classificazione, si procede quindi con uno dei livelli successivi.
- Il Livello 3 prevede l'esecuzione di valutazioni preliminari atte a comprendere, unitamente all'analisi della tipologia ed entità dei dissesti rilevati nelle ispezioni

eseguite al Livello 1, se sia comunque necessario procedere ad approfondimenti mediante l'esecuzione di verifiche accurate di Livello 4.

- Il Livello 4 prevede l'esecuzione di valutazioni accurate sulla base di quanto indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti.
- Il Livello 5, non trattato esplicitamente nelle Linee Guida, si applica ai ponti considerati di significativa importanza all'interno della rete, opportunamente individuati.

2.4.1 Panoramica della struttura delle Linee Guida

Nella seguente figura è riportato il diagramma di flusso che descrive l'approccio multilivello.

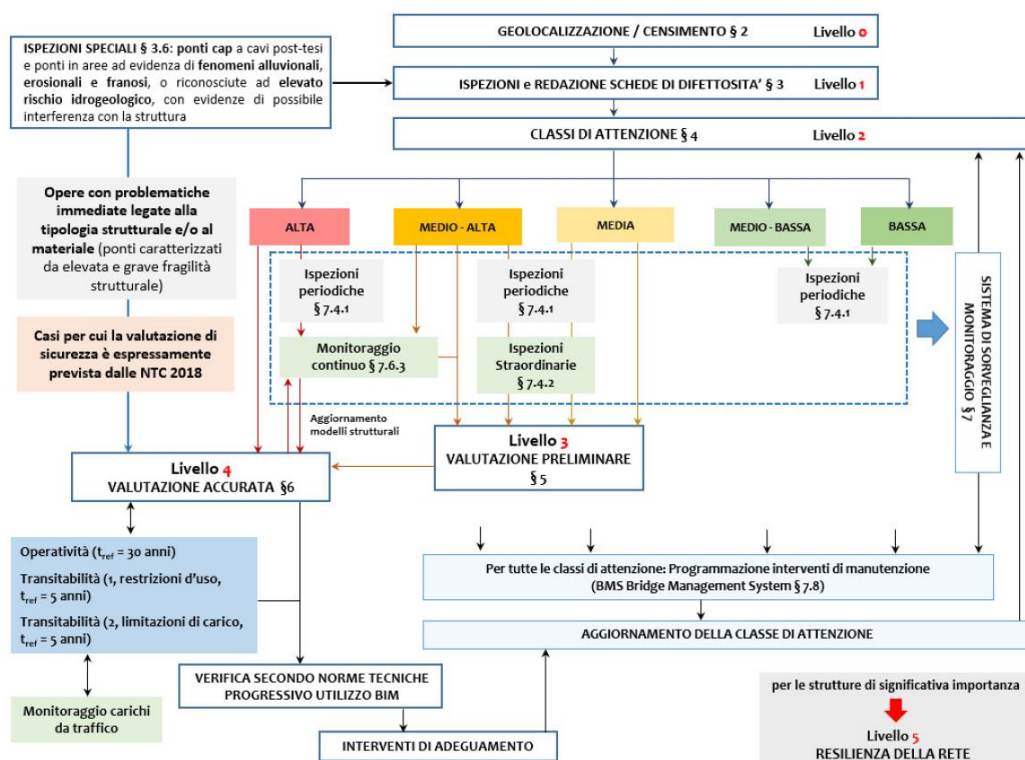


Figura 2.15: Diagramma di flusso dell'approccio multilivello proposto dalle Linee Guida [3]

Il fulcro centrale dell'approccio multilivello è il Livello 2 nel quale sono definite le Classi di Attenzione (CdA) [3]. Le Classi di Attenzione sono cinque e sono definite in funzione dei fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Ad ogni classe è associata una conseguente azione in termini di indagini, monitoraggio e verifiche. In particolare [3]:

- Classe di Attenzione *Alta*: sui ponti che ricadono in questa classe è opportuno l'immediato avvio di valutazioni più accurate, sia in termini di valutazioni di sicurezza sia di approfondimenti sulle caratteristiche geotecniche e/o strutturali. L'esecuzione di valutazioni accurate dà la possibilità di implementare un modello della struttura la cui affidabilità e accuratezza dipende dal livello di conoscenza raggiunto. Le modalità

di esecuzione delle valutazioni accurate sono previste dal Livello 4 dell'approccio multilivello;


- Classe di Attenzione *Medio-Alta*: classe per la quale è previsto l'impiego di valutazioni preliminari di Livello 3 e l'esecuzione delle ispezioni periodiche ordinarie e, ove si rendesse necessario, delle ispezioni periodiche straordinarie e l'installazione di sistemi di monitoraggio periodico o continuo;
- Classe di Attenzione *Media*: occorre eseguire valutazioni preliminari di Livello 3, così come descritto per la CdA Medio-Alta, ed ispezioni periodiche ordinarie. L'ente proprietario e/o gestore verifica quindi, caso per caso, sulla base delle valutazioni di Livello 3, se sia necessario installare sistemi di monitoraggio periodico o continuo (riclassificando il ponte in CdA Medio-Alta) oppure se eseguire valutazioni accurate di sicurezza di Livello 4 (riclassificando il ponte in CdA Alta);
- Per i ponti in Classe di Attenzione *Medio-Bassa* non sono previste valutazioni o analisi diverse da quelle già eseguite bensì l'esecuzione di ispezioni periodiche frequenti;
- Per i ponti in CdA *Bassa* non sono previste valutazioni o analisi diverse da quelle già eseguite bensì l'esecuzione di ispezioni periodiche.

2.4.2 Descrizione dell'approccio multilivello

Di seguito saranno descritti i livelli con cui viene condotta l'analisi per l'attribuzione della Classe d'Attenzione al ponte esaminato.

Livello 0 – Censimento

Nel dettaglio della procedura, il Livello 0 costituisce il primo passo nell'analisi e consiste in una ricerca documentale ai fini del censimento delle caratteristiche strutturali attraverso la compilazione di una scheda anagrafica allegata alle Linee Guida.

Schede di censimento ponti di Livello 0 

Codice IOP: _____ Nome Ponte/Viadotto: _____
 Strada di appartenenza: _____ Progressiva km iniziale: _____ Progressiva km finale: _____

Localizzazione

Provincia/Regione: _____	Coordinate Geografiche <input type="radio"/> ETRF2000 <input type="radio"/> WGS84	Centro	Quota s.l.m. [m]: _____
Comune: _____		Longitudine: _____	Latitudine: _____
Località: _____		Iniziale	Quota s.l.m. [m]: _____
Sismicità dell'area [a/g] (Suolo A, TR = 475 anni)		Longitudine: _____	Latitudine: _____
		Finale	Quota s.l.m. [m]: _____
		Longitudine: _____	Latitudine: _____

Fenomeni erosivi e di alluvionamento Assenti Già valutati Da verificare
 Fenomeni franosi Assenti Già valutati Da verificare

Informazioni generali

Proprietario _____	Anno di costruzione/ristrutturazione	Ultimazione costruzione (collaudo)	Eventuali interventi sostanziali
Concessionario _____		<input type="radio"/> Effettivo <input type="radio"/> Presunto	<input type="radio"/> Effettivo <input type="radio"/> Presunto
Ente vigilante _____			

Figura 2.16: Prima pagina della scheda di censimento dei ponti (Allegato A – Linee Guida)[3]

Nella scheda anagrafica sono riportati i dati inerenti a:

- Localizzazione dell'opera
- Informazioni generali
- Dati di progetto
- Stato dell'opera
- Classificazione del collegamento e Classificazione d'uso stradale
- Dati geomorfologici
- Caratteristiche geometriche (luce, larghezza dell'impalcato, tracciato)
- Tipologia strutturale (muratura, C.A., schema statico)
- Caratteristiche degli elementi (pile, spalle, impalcato, giunti)
- Interventi di manutenzione e ispezioni pregresse
- Documenti disponibili inerenti al progetto e al rischio idrogeologico

Livello 1 – Ispezioni visive

Il Livello 1 è il secondo passo nell'analisi e consiste nell'esecuzione di ispezioni visive sulle opere catalogate nel Livello 0. In particolare, le ispezioni visive sono finalizzate a “*verificare l'attendibilità dei dati raccolti nel censimento di Livello 0, raccogliere ulteriori informazioni circa le effettive caratteristiche geometriche e strutturali dell'opera in esame e del sito di costruzione e valutare, seppur in maniera speditiva e sommaria, il grado di conservazione delle strutture*”[3]. Esse forniscono una rappresentazione quanto più oggettiva della situazione di degrado dell'opera e il suo stato di conservazione mediante un accurato rilievo fotografico, il rilievo geometrico e il rilievo dei principali fenomeni di degrado presenti. L'ispezione visiva si traduce nella redazione di un documento chiamato “*Scheda di difettosità*” riportate in allegato alle Linee Guida. Le schede sono differenti per ogni elemento costituente il ponte e materiale di realizzazione. Lo stato di salute del ponte non è fornito dalle schede di difettosità ma quest'ultime influenzano la valutazione sugli interventi di manutenzione che interessano l'opera.

Ogni scheda di difettosità riporta un elenco dei difetti tipici suddivisi per elemento del ponte e materiale. A ciascun difetto è associato:

- un peso G rappresentato da un numero che varia da 1 a 5, dal difetto meno grave al difetto più grave. Ai pesi 4 e 5 sono associati i difetti che richiedono l'esecuzione di un rilievo accurato in quanto potrebbero insorgere immediati e rilevanti problemi strutturali. In corrispondenza di valori di $G = 4$ o $G = 5$ è possibile segnalare nella casella “PS” il caso in cui la presenza del difetto compromette la statica dell'opera rappresentandone un rischio notevole per l'opera;
- un coefficiente k_1 che indica l'estensione del difetto (da 0.2 a 1);
- un coefficiente k_2 che indica l'intensità del difetto (da 0.2 a 1);
- il numero delle foto effettuate al difetto;
- Nel caso in cui il difetto elencato nella scheda non sia rilevato sulla struttura, occorre segnalarlo mediante:
 - la casella NA nel caso in cui il difetto non sia applicabile alla tipologia di elemento in analisi;

- la casella *NR* se il difetto non si può rilevare mediante ispezione visiva;
- la casella *NP* se il difetto non è effettivamente presente.

Scheda Ispezione Ponti di Livello 1														
1		Spalle	N _____	Strada di appartenenza: _____		Progressiva km: _____								
Calcestruzzo		Tecnico rilevatore: _____			Data ispezione: ___/___/___									
Codice difetto	Descrizione difetto	visib	G	Estensione K1			Intensità K2			N° foto	PS	NA	NR	NP
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1					
c.a./c.a.p. 1	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 2	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen. 1	Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 3	Cis dilavato / ammalorato	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen. 2	Ristagni d'acqua	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 4	Vespai	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 5	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 6	Armatura ossidata/corrosiva	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 7	Lesioni a ragnatela modeste	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 8	Fessure orizzontali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 9	Fessure verticali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 10	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 11	Lesioni attacco pilastri (spalle a telaie)	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 12	Riprese successive deteriorate	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen. 3	Danni da urto	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen. 6	Fuori piombo	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ril/Fond. 1	Scalzamento	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ril/Fond. 2	Dilavamento del rilevato	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ril/Fond. 3	Dissesto del rilevato - deformazioni	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ril/Fond. 4	Dissesto del rilevato - stabilità	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ril/Fond. 5	Movimenti di fondazione	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p. 13	Lesioni da schiacciamento	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen. 4	Lesioni caratteristiche zone appoggio	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Eventuali note														

Figura 2.17: Scheda di difettosità dell'opera (Allegato B – Linee Guida) [3]

Nell'intestazione di ogni scheda di difettosità sono riportati:

- La localizzazione del ponte nell'intestazione della scheda;
- Gli elementi a cui la scheda è riferita (N);
- La data di ispezione e i riferimenti dell'ispettore.

Al termine di ogni scheda è presente uno spazio per riportare eventuali note e osservazioni. In aggiunta alle schede di difettosità, è necessario compilare la *scheda descrittiva di ispezione* con le caratteristiche principali della struttura già rilevate durante l'ispezione visiva, quali tipologia strutturale, tipologia e materiale degli elementi strutturali, caratteristiche idro-geomorfologiche del territorio, schemi geometrici di massima e così via, al fine di accertare l'affidabilità dei dati raccolti nel Livello 1 [3].

Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

Strada di appartenenza: _____ Progressiva km: _____
 Tecnico rilevatore: _____ Data ispezione: _____

Localizzazione

Provincia/Regione: _____
 Comune: _____
 Località: _____

Coordinate Geografiche	Centro	
	Quota s.l.m. [m]: _____	Longitudine: _____ Latitudine: _____
	Quota s.l.m. [m]: _____	Longitudine: _____ Latitudine: _____
	Quota s.l.m. [m]: _____	Longitudine: _____ Latitudine: _____

ETRF2000
 WGS84

Tipologia strutturale

<input type="radio"/> Arco in Muratura	<input type="radio"/> Travate appoggiate	<input type="radio"/> Travate continue	<input type="radio"/> Soletta in C.A.	<input type="radio"/> Sezione tubolare in c.a.
<input type="radio"/> Arco in C.A.	<input type="radio"/> Travate Gerber	<input type="radio"/> Cassone in Precompresso	<input type="radio"/> Sezione tubolare in acciaio	<input type="radio"/> Arco in acciaio
<input type="radio"/> Stralato o sospeso	<input type="radio"/> Altro _____		<input type="radio"/> Travate in c.a.p. a cavi post-tesi	

Tipologia delle Fondazioni	Classificazione delle vie di attacco
<input type="radio"/> Fondazioni dirette	<input type="radio"/> Rilevato in terra
<input type="radio"/> Fondazioni indirette	<input type="radio"/> Rilevato in terra rinforzata/armata
<input type="radio"/> Murature	<input type="radio"/> Rilevato in golenia
<input type="radio"/> Pile in alveo	

Figura 2.18: Prima pagina della scheda descrittiva di ispezione (Allegato B – Linee Guida) [3]

In fase di ispezione visiva, è necessario compilare la “*Scheda Frane e idraulica*” per tenere in considerazione i potenziali eventi franosi e alluvionali dell’area sulla quale sorge il ponte. Gli elementi della scheda sono relazionati alle tre componenti della Classe di Attenzione: suscettibilità, vulnerabilità ed esposizione. In particolare [3]:

- La *suscettibilità* dipende dal volume mobilizzante della frana (magnitudo), della sua massima velocità e del suo stato di attività;
- La *vulnerabilità* è funzione della tipologia strutturale del ponte (struttura isostatica o iperstatica), dell’estensione dell’eventuale coinvolgimento del rischio idrogeologico (se è interessata l’intera struttura o solo una parte di essa) e della tipologia di fondazioni;
- Il livello di *esposizione* riguarda la valutazione delle potenziali conseguenze negative di future alluvioni, non solo per la struttura oggetto di valutazione, ma anche per le conseguenze indotte (inondazioni).

Rischio frane

Area riconosciuta pericolosa (allegare riferimenti)

<input type="radio"/> Fenomeno riconosciuto ma non ancora studiato	<input type="radio"/> Fenomeno riconosciuto e studiato
<input type="radio"/> Fenomeno modellato e oggetto di monitoraggio	<input type="radio"/> Fenomeno oggetto di opere di mitigazione

Contesto geologico

Formazioni

Unità 1 _____

Unità 2 _____

...

Tipologia di fenomeno

<input type="radio"/> Accertato	<input type="radio"/> Potenziale
<input type="radio"/> Crollo in roccia	<input type="radio"/> Ribaltamento
<input type="radio"/> Colate e valanghe detritiche	<input type="radio"/> Colate viscoso e traslative
<input type="radio"/> Scorrimento rotazionale	<input type="radio"/> Scorrimento traslativo
<input type="radio"/> Complesso e composito	<input type="radio"/> Fenomeni gravitativi profondi

Distribuzione di attività (se definibile dai dati in possesso)

<input type="radio"/> Costante	<input type="radio"/> Retrogressivo	<input type="radio"/> In allargamento	<input type="radio"/> Avanzante	<input type="radio"/> In diminuzione
<input type="radio"/> Confinato	<input type="radio"/> Multidirezionale			

Uso suolo dell’area potenzialmente coinvolta (incidente sulla difficoltà di determinazione)

<input type="radio"/> Area urbanizzata	<input type="radio"/> Area estrattiva	<input type="radio"/> Seminativo	<input type="radio"/> Colture	<input type="radio"/> Vegetazione riparia
<input type="radio"/> Rimboschimento	<input type="radio"/> Bosco ceduo	<input type="radio"/> Bosco d’alto fusto	<input type="radio"/> Incolto nudo	<input type="radio"/> Incolto macchia cespugliato

Figura 2.19: Pagina tratta dalla scheda “Frane e alluvioni” (Allegato B – Linee Guida) [3]

In relazione alle eventuali criticità emerse nelle ispezioni visive, è possibile richiedere l’esecuzione diretta di valutazioni approfondite e di dettaglio previste dal Livello 4 per ponti particolarmente fragili e con segni di degrado pericolosi senza necessariamente passare dalla classificazione del rischio.

Campagna di indagini per la valutazione dei difetti

Indagini semi-distruttive/distruttive		Elementi indagati (tipologia e numero)	N° totale di indagini eseguite
Tipologia di indagini (endoscopie, indagini vacuometriche, saggi localmente distruttivi, ecc.)	1) _____ 2) _____ -) _____	_____ _____ _____	_____ _____ _____

Risultati delle indagini (compilare una tabella per ogni elemento indagato e tipologia di indagine)

Tipologia elemento indagato _____		Tipologia di indagine _____	
Tipologie di difetti individuati _____			
Localizzazione dei difetti (vuoti all'interno delle guaine, fenomeni di ossidazione dei cavi, ecc.)	Schema di localizzazione dei difetti:		
Indicare la localizzazione delle indagini			

Figura 2.20: Pagina tratta dalla “Scheda di ispezione speciale” (Allegato D – Linee Guida) [3]

Le Linee Guida richiedono agli Enti gestori una particolare attenzione per la valutazione della sicurezza per i ponti in calcestruzzo armato precompresso a cavi post-tesi resi aderenti in quanto risulta difficile stabilire le reali condizioni di degrado nei cavi interni. In questi casi è necessario eseguire indagini speciali mirate all’individuazione del tracciato del cavo e dei difetti. Le prove possono essere test non distruttivi e test semi-invasivi. I risultati delle ispezioni specifiche sono riportati nella “Scheda di ispezione speciale”. Qualora nella scheda si evidenziassero gravi problemi di sicurezza strutturale del ponte esaminato, occorre eseguire analisi più approfondite secondo quanto riportato a Livello 4.

Livello 2 – Determinazione della Classe di Attenzione

Il Livello 2 consiste nella classificazione dei ponti su scala territoriale mediante una stima approssimata dei fattori di rischio approssimato attraverso la *Classe di Attenzione* (CdA). La valutazione della classe di attenzione è una stima approssimata del livello di rischio poiché è basata su valutazioni derivanti dalle ispezioni visive del degrado, dalla tipologia strutturale e dalle ripercussioni derivanti per l’infrastruttura e gli utenti di quest’ultima. La classe di attenzione, infatti, è utile per stabilire un ordine di priorità per l’approfondimento delle verifiche e per la programmazione degli interventi manutentivi e strutturali necessari. Pertanto, l’analisi dei rischi rilevanti, che si traduce nell’attribuire una classe di attenzione, è la tappa cruciale per le successive decisioni da intraprendere sul ponte.

Le classi di attenzione sono cinque:

- Classe Alta;
- Classe Media-Alta;
- Classe Media;
- Classe Medio-Bassa;
- Classe Bassa.

Il valore della classe è elaborato dai risultati delle ispezioni visive e valutando, per ogni singolo ponte, la pericolosità, l’esposizione e la vulnerabilità.

Nella valutazione dei rischi considerati rilevanti per i ponti, è necessario distinguere quattro tipologie di rischi in base alle azioni prevalenti agenti sulla struttura ed ai diversi periodi di ritorno:

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

Ad ogni tipologia di rischio sono associate diverse classi di attenzione:

- Classe di Attenzione strutturale e fondazionale;
- Classe di Attenzione sismica;
- Classe di Attenzione frane;
- Classe di Attenzione idraulica.

I metodi per valutare le diverse tipologie di classi sono basati su approcci e regole comuni, mentre i parametri che le definiscono differiscono sulla base del rischio considerato. Le diverse classi di attenzione associate ai rischi rilevanti sono combinate in modo da determinare la CdA complessiva del ponte.

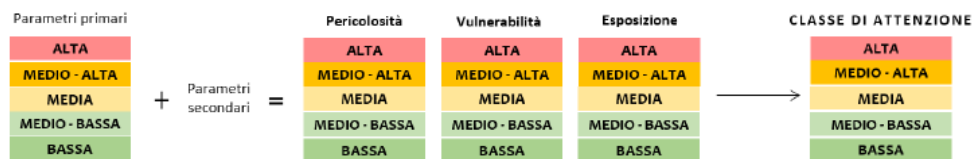


Figura 2.21: Diagramma di flusso per valutare la Classe di Attenzione [3]

Nello schema di definizione del rischio, la CdA è la combinazione di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Ciascuno di questi tre fattori è determinato da parametri primari e secondari. Mediante un approccio “*classi ed operatori logici*”, ogni parametro primario e secondari viene raggruppato in classi e ogni classe viene combinata tra loro mediante flussi logici, come mostrato nel diagramma di flusso riportato in figura. La norma sottolinea che, nell’approccio per classi ed operatori logici utilizzato, non è previsto il calcolo di termini numerici. Di seguito si analizzano i dettagli dell’approccio declinato alle varie tipologie di Classe di Attenzione.

La definizione della classe di attenzione strutturale e fondazionale considera il comportamento strutturale dell’opera nelle condizioni di esercizio. Quindi considera i seguenti parametri:

- entità e frequenza dei carichi da traffico;
- fattori inerenti alle caratteristiche strutturali del ponte;
- parametri legati al corretto funzionamento e gestione della rete stradale di appartenenza.

In figura è riportata la tabella dei parametri primari e secondari con riferimento alla classe di attenzione strutturale e fondazionale.

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

Figura 2.22: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione strutturale e fondazionale [3]

La *pericolosità* per la CdA strutturale e fondazionale è legata alla probabilità che il ponte sia interessato dal passaggio di carichi di massa rilevante, tra cui i veicoli commerciali, ossia i veicoli la cui sagoma corrisponde a tipologie con portata superiore a 3,5 t. Le classi di pericolosità sono cinque e fanno riferimento alle limitazioni di transito vigenti all'atto della relativa valutazione.

Il fattore *vulnerabilità* per la CdA strutturale e fondazionale dipende da diversi parametri; in particolare:

- Parametri principali: livello di difettosità, schema strutturale, luce, materiale e numero di campate;
- Parametri secondari: rapidità di evoluzione del degrado e norma di progettazione.

Esso è il risultato della combinazione dei vari parametri, secondo lo schema logico riportato in figura.

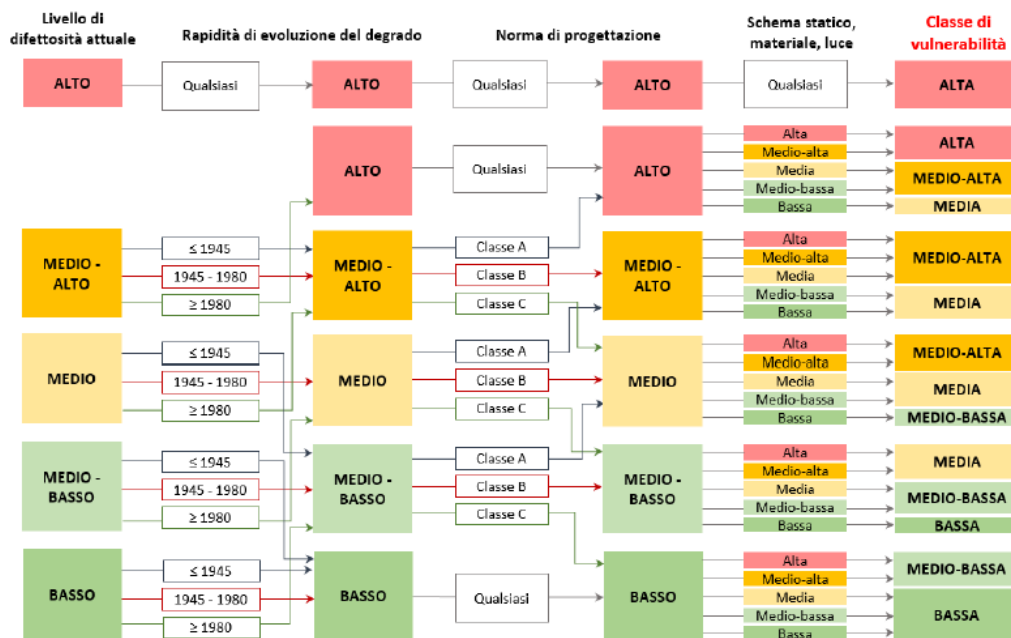


Figura 2.23: Determinazione della classe di vulnerabilità strutturale e fondazionale [3]

La norma fornisce delle tabelle per valutare il livello di difettosità, l'influenza dello schema statico e la rapidità di evoluzione del degrado a partire dall'elaborazione dei risultati delle indagini

speditive e del rilievo difettologico previsto dal Livello 1 dell'approccio multilivello. Attraverso la combinazione di queste componenti si perviene alla definizione della CdA strutturale e fondazionale.

La stima del livello di *esposizione* è basata sui dati di traffico relativi alla rete stradale di interesse, in termini di frequenza dei veicoli transitanti, oltre che su fattori legati alla capacità della rete di fronteggiare situazioni impreviste, ossia alla sua resilienza. I parametri da considerare per la valutazione del fattore esposizione sono:

- parametri primari: Livello di Traffico Giornaliero Medio (TGM) e luce della campata;
- parametri secondari: presenza o meno di alternative stradali, tipologia di ente scavalcato, trasporto di merci pericolose.

Analogamente alla classe di vulnerabilità, si definiscono cinque classi di esposizione come riportato in figura.

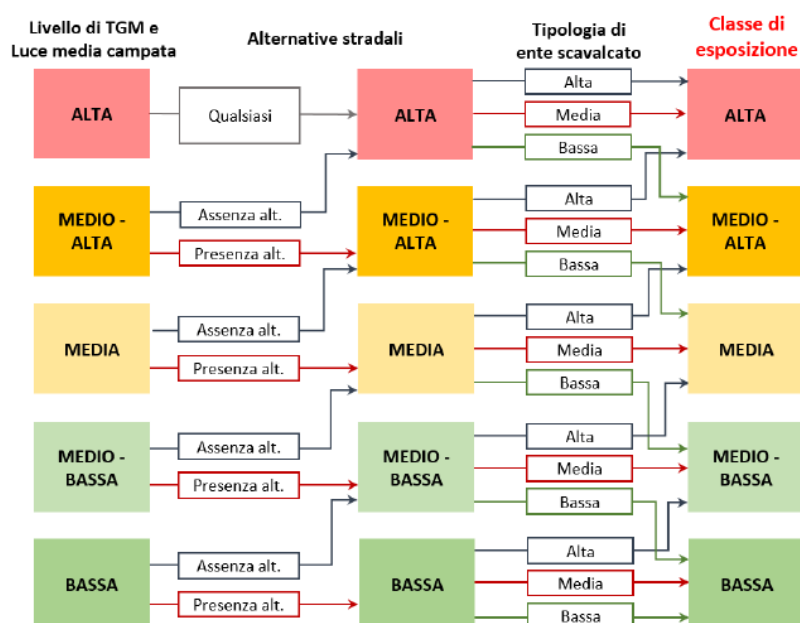


Figura 2.24: Determinazione della classe di esposizione strutturale e fondazionale [3].

Noti i parametri in gioco, si procede con la determinazione della classe di attenzione (CdA) strutturale e fondazionale, combinando la classe di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione del ponte, per un totale di 5^3 combinazioni descritte in tabelle fornite dalla norma. La vulnerabilità all'interno del processo avrà un peso maggiore rispetto all'esposizione e alla pericolosità. In altre parole, Un ponte con gravi problemi strutturali (derivanti dal livello di degrado) avrà sempre una Classe di Attenzione elevata, anche con bassi livelli delle classi di pericolosità ed esposizione.

Classe di pericolosità ALTA

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

Classe di pericolosità MEDIO-ALTA

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

Classe di pericolosità MEDIA

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

Classe di pericolosità MEDIO-BASSA

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

Figura 2.25: Determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale [3]

Il rischio sismico è molto rilevante in ambito nazionale, a fronte dei recenti terremoti che nell'ultimo decennio hanno colpito l'Italia. La problematica risulta rilevante anche per i ponti esistenti a causa della loro vetustà e per l'adozione di schemi strutturali caratterizzati da scarsa robustezza e concepiti spesso con norme tecniche prive di dettagli antisismici.

La definizione della CdA del rischio sismico tiene conto dei principali parametri che possono influire sulla risposta dinamica del ponte, in funzione dei fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione in analogia a quanto già descritto per il rischio strutturale e fondazionale.

	Parametri primari	Parametri secondari
Pericolosità	Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica	Categoria di sottosuolo
Vulnerabilità	Schema strutturale, luce e materiale Livello di difettosità	Criteri di progettazione
Esposizione	Livello di TGM e luce media della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Trasporto di merci pericolose Strategicità dell'opera

Figura 2.26: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione per il rischio sismico [3]

La *pericolosità* sismica di un ponte esistente dipende dai parametri derivanti dalla mappa del rischio sismico, ossia l'accelerazione di picco al suolo (con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suoli rigidi), e di quelli propri della morfologia del territorio su cui è costruito, ovvero la categoria topografica e l'amplificazione stratigrafica valutata mediante la categoria del sottosuolo.

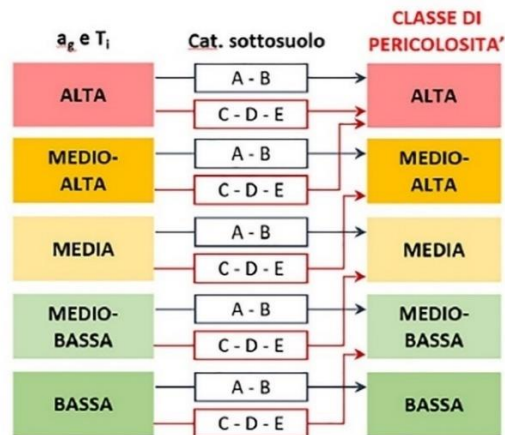


Figura 2.27: Determinazione della classe di pericolosità sismica [3].

In analogia a quanto già descritto per la vulnerabilità strutturale e fondazionale, anche per il rischio sismico il grado di *vulnerabilità* sismica dei ponti esistenti è definito dalle caratteristiche e gli schemi strutturali i parametri principali, in base allo schema a flussi riportato nella figura e tratto dalla norma.

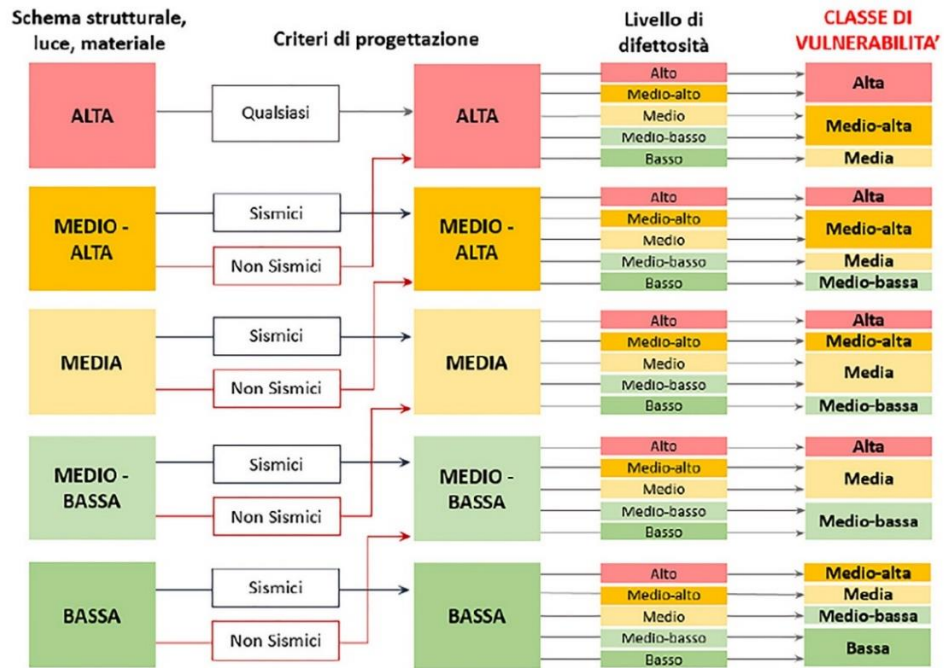


Figura 2.28: Determinazione della classe di vulnerabilità sismica [3].

L'esposizione sismica è determinata con le medesime modalità di quella strutturale fondazionale.



Figura 2.29: Determinazione della classe di esposizione sismica[3].

La CdA del rischio sismico sarà definita, in analogia a quanto visto già per il rischio strutturale fondazionale con la medesima tabella fornita dalla norma, mediante la combinazione dei livelli di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

Nel fragile contesto idrogeologico che caratterizza il territorio italiano, i dissesti idrogeologici sono sempre più ricorrenti e rappresentano una problematica da tenere in considerazione nella valutazione della sicurezza nei ponti esistenti. L'esempio più recente è una frana che ha spazzato via un tratto di viadotto dell'autostrada Torino-Savona.

La definizione della CdA del rischio frane è analoga a quanto visto per il rischio strutturale-fondazionale e sismico. Tuttavia, vi è la sola differenza che in questo caso si utilizza il termine di "suscettibilità" anziché quello di "pericolosità".

	Parametri primari	Parametri secondari
Suscettibilità	Instabilità di versante (Magnitudo, Velocità, Stato di attività)	Incertezza di modello Misure di mitigazione
Vulnerabilità	Tipologia/robustezza del ponte e tipologia di fondazioni	Estensione dell'interferenza
Esposizione	Livello di TGM e luce della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Strategicità dell'opera

Figura 2.30: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione per il rischio frane [3].

Il livello di suscettibilità dipende dal contesto geomorfologico dove è situato il ponte, come desumibile dalle schede di Livello 0 o dalle ispezioni di Livello 1.

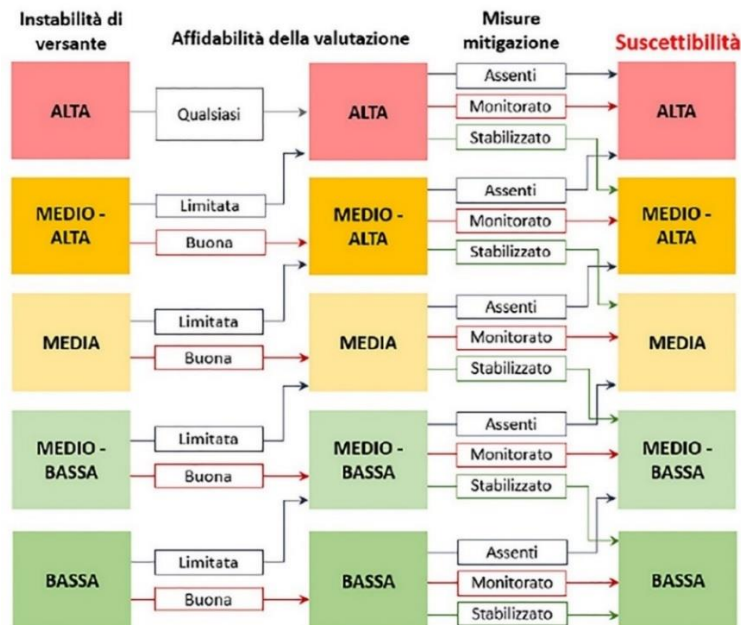


Figura 2.31: Determinazione della classe di suscettibilità per rischio frane [3].

La *vulnerabilità* nella valutazione della CdA per rischio frane dipende dalla robustezza dello schema strutturale e dall'estensione dell'interferenza.

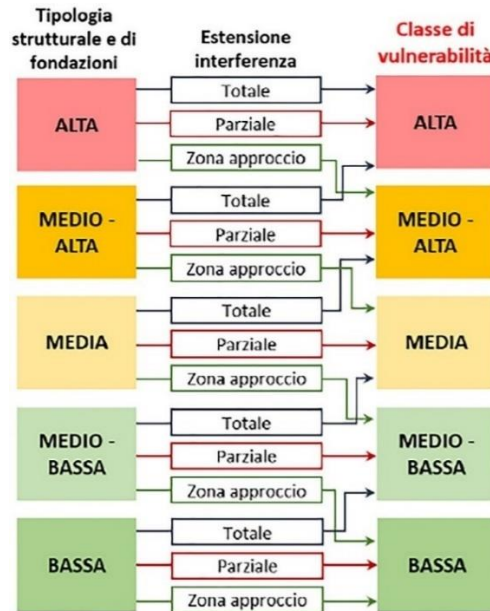


Figura 2.32: Determinazione della classe di vulnerabilità per rischio frane [3].

Per la stima del livello di *esposizione* si seguono gli stessi criteri e gli stessi parametri impiegati per la stima del livello di esposizione sismica.

La CdA del rischio sismico sarà definita, in analogia a quanto visto già per il rischio strutturale fondazionale, con la tabella fornita dalla norma in cui, a differenza della tabella per il rischio strutturale e fondazionale, è riportato il livello di suscettibilità e non di pericolosità.

La definizione della CdA del rischio idraulico è analoga a quanto visto per il rischio strutturale-fondazionale, sismico e frane. Tuttavia, in analogia al rischio frane, anche in questo caso si utilizza il termine di “*suscettibilità*” anziché quello di “*pericolosità*”.

	Parametri primari	Parametri secondari
Pericolosità/Suscettibilità	Probabilità di accadimento e consistenza evento	Incertezza di modello Misure di mitigazione
Vulnerabilità	Resilienza all'evento naturale	Tipologia, magnitudo e frequenza evento Tipologia ed efficienza opere di mitigazione
Esposizione	Danno potenziale	Tipologia di ente scavalcato Importanza strategica dell'opera Estensione del danno

Figura 2.33: Parametri per la determinazione di fattori della classe di attenzione per il rischio idraulico [3]

La valutazione della *suscettibilità* al rischio idraulico fa riferimento ai livelli di pericolosità riportati nel D.Lgs. 23.02.2010, n. 49 – “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni”.

Per l’individuazione della *vulnerabilità* si valutano i seguenti parametri:

- il valore della portata della piena;
- l’estensione dell’area interessata dell’inondazione;
- l’altezza e la relativa quota idrica nonché le caratteristiche cinematiche della corrente.

Successivamente si analizza, tramite le tabelle riportate nella norma, il livello di vulnerabilità.

In analogia con il rischio frane, per la stima del livello di *esposizione* per il rischio idraulico si seguono gli stessi criteri e gli stessi parametri impiegati per la stima del livello di esposizione sismica.

Al termine del procedimento logico per definire le diverse Classe di Attenzione (rischio strutturale e fondazionale, sismico, frane e idraulico), si perviene ad una Classe di Attenzione complessiva ossia un unico parametro finale che è ottenuto pesando le singole classi in un’unica classe sintetica. La Classe di Attenzione complessiva è definita attraverso giudizi qualitativi e non numerici, in bassa, medio-bassa, media, medio-alta e alta, sulla base della quale, infine, si pianificheranno le successive azioni da intraprendere sul ponte (indagini, controlli, verifiche, approfondimenti specifici) [3]. Si riporta in seguito la tabella della norma per determinare la Classe di Attenzione complessiva.

Classe di attenzione strutturale/fondazionale ALTA

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

Classe di attenzione strutturale/fondazionale MEDIO - ALTA

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

		Classe di attenzione strutturale/fondazionale MEDIA				
		Classe di attenzione idraulica e frane				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di attenzione sismica	Alta	Alta	Medio-Alta		Media	
	Medio-Alta	Medio-Alta		Media		
	Media	Medio-Alta	Media			
	Medio-Bassa	Media				Medio-Bassa
	Bassa	Media			Medio-Bassa	

		Classe di attenzione strutturale/fondazionale MEDIO-BASSA				
		Classe di attenzione idraulica e frane				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di attenzione sismica	Alta	Medio-Alta	Media			
	Medio-Alta	Media				Medio-Bassa
	Media	Media			Medio-Bassa	
	Medio-Bassa	Media		Medio-Bassa		
	Bassa	Media	Medio-Bassa			

		Classe di attenzione strutturale/fondazionale BASSA				
		Classe di attenzione idraulica e frane				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di attenzione sismica	Alta	Media			Medio-Bassa	
	Medio-Alta	Media		Medio-Bassa		
	Media	Media	Medio-Bassa			
	Medio-Bassa	Medio-Bassa				Bassa
	Bassa	Medio-Bassa		Bassa		

Figura 2.34: Determinazione della classe di attenzione complessiva del ponte esistente [3].

Si può notare come il peso maggiore è assegnato alla CdA strutturale-fondazionale, in quanto strettamente legata alle condizioni di esercizio. Inoltre, un'ulteriore semplificazione riguarda il raggruppamento delle CdA frane e idraulica in un'unica CdA determinata utilizzando l'approccio per classi e operatori logici.

Livello 3 – Valutazione preliminare

In questo livello si eseguono delle indagini sui difetti evidenziati nelle schede di Livello 1. Nella norma si riporta che le analisi di Livello 3 [3]:

- Non sono obbligatorie per CdA Bassa o Medio-Bassa;
- Sono obbligatorie per CdA Media e Medio-Alta.

Lo scopo delle analisi di Livello 3 è di definire se proseguire con una verifica più approfondita e precisa di Livello 4 [3]. Per i ponti con CdA Alta si salta il Livello 3 e si procede con le verifiche di Livello 4. In particolare, l'obiettivo è di valutare le risorse garantite dalle norme utilizzate all'epoca della progettazione dell'opera rispetto alle normative attualmente vigenti.

In altre parole, si valuta il rapporto tra la domanda indotta sui vari elementi che compongono il ponte (solette, traversi, travi e/o strutture principali, pile, spalle, apparecchi di vincolo e fondazioni) dai carichi da traffico previsti dalle norme dell'epoca e la domanda ottenuta utilizzando i modelli di traffico previsti dalle norme attualmente vigenti [3].

Livello 4 – Valutazione accurata

I ponti che nel precedente Livello 3 riportano criticità e i ponti con una Classe di Attenzione Alta sono analizzati al Livello 4 con una valutazione più completa ai sensi del Capitolo 8 delle NTC2018 e Circolare 21/01/19.

Al termine delle verifiche del Livello 4, si individua il livello di sicurezza del ponte in esame. Le Linee Guida distinguono tre diverse situazioni per un ponte [3]:

- *adeguato*, quando le verifiche siano soddisfatte secondo le Norme Tecniche utilizzando i carichi e i fattori parziali in esse previsti;
- *operativo*, un ponte per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite utilizzando i principi esposti nelle Norme Tecniche ma facendo riferimento nella valutazione dei fattori parziali relativi ai carichi e ai materiali ad un tempo di riferimento ridotto;
- *transitabile*, un ponte per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite su un orizzonte temporale ridotto, entro il quale si progettino e realizzino lavori di adeguamento o operatività, adottando i provvedimenti:
 - “limitazione dei carichi consentiti”
 - “restrizione d’uso del ponte”.

Inoltre, in accordo con quanto previsto dalle NTC18 e dalla Circolare 21/01/2019, è necessario quantificare la valutazione della sicurezza mediante due parametri [18][1]:

- ζ_E ovvero il rapporto tra l’azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l’azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul medesimo suolo e con le medesime caratteristiche [18];
- $\zeta_{V,i}$ ovvero il rapporto tra il valore massimo del sovraccarico verticale variabile sopportabile dalla parte *i*-esima della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione [18].

2.5 Conclusioni

Dall’analisi dello stato di fatto della manutenzione delle opere in Italia è emerso che il fragile patrimonio dei ponti esistenti risulta essere in condizioni precarie a seguito delle articolate modalità di pianificazione degli interventi di manutenzione. Infatti, il processo di manutenzione dei ponti esistenti in Italia risulta particolarmente complesso a causa delle seguenti circostanze [14]:

- la gestione delle strade è affidata a enti diversi (Anas, Autostrade, Provincie, Comuni, ...), a seguito del D. L. n° 112 del 31.03.1998 "Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della L. 15 marzo 1997, n. 59" dove si afferma che la responsabilità da parte dello Stato della gestione delle strade è delegata agli Enti Locali (Regioni e Province);

- molto spesso gli enti non possiedono un database delle opere da mantenere per le quali risultano responsabili; dunque, l'accesso ai documenti da parte del manutentore risulta difficoltoso;
- la catalogazione delle opere d'arte, quando è stata eseguita, risulta limitata ad un numero ristretto di manufatti, con schedature contenenti informazioni sommarie e incomplete spesso riguardanti solo una descrizione superficiale delle opere;
- non esiste un protocollo comune nella gestione e nella manutenzione delle reti viarie e delle opere d'arte;
- le visite programmate, quando effettuate, spesso vengono attuate sulla base di semplici ispezioni visive e senza il supporto dei necessari protocolli di ispezione, e da parte di personale che in molti casi non possiede le conoscenze tecniche necessarie.
- i protocolli di ispezione, quando esistenti, spesso non sono di supporto al processo decisionale che non può prescindere dal ruolo dell'opera all'interno della rete viaria;
- spesso la responsabilità di vigilanza sul territorio è delegata a pochi soggetti che hanno il compito di garantire sicurezza ed efficienza su diverse centinaia di km di reti viarie;
- gli enti gestori hanno, da un lato, l'obbligo di garantire il mantenimento in efficienza della rete e dall'altro l'esigenza di ottimizzare il budget disponibile, in molti casi insufficiente a soddisfare le prescrizioni di legge.

Le cause sopraccitate hanno fatto sì che il rispetto delle normative da parte degli Enti gestori non sempre venga garantito [2]. Dunque, in questa situazione è risultato necessario emanare le nuove Linee Guida per armonizzare i diversi strumenti per la definizione degli interventi di manutenzione a disposizione dei gestori dei ponti italiani e aiutare quest'ultimi nel processo decisionale in maniera efficace evitando spreco di risorse economiche e intellettuali. In particolare, gli strumenti operativi previsti dalle Linee Guida per garantire una corretta gestione delle infrastrutture si basano sulle ispezioni visive, sul monitoraggio strumentale e sui sistemi di gestione dei dati e delle informazioni (*Bridge Management Systems – BMS*), che saranno descritti nel prossimo capitolo.

3 Stato dell'arte dei modelli di degrado nel *Bridge Management System*

3.1 Introduzione

Le “Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti” riportano nel Capitolo 7 le indicazioni, i criteri ed i requisiti minimi delle procedure da adottare da parte dagli Enti pubblici e privati gestori di trasporto sul territorio nazionale, per pianificare ed effettuare le attività di gestione della sicurezza strutturale (quali sorveglianza, controllo, ispezione e monitoraggio) dei ponti esistenti, in maniera uniforme per tutto il territorio nazionale, in applicazione della procedura generale multilivello [3].

Nello sviluppo dei requisiti minimi delle procedure che devono adottare gli Enti pubblici e privati si è tenuto conto dei sistemi di sorveglianza già in uso presso alcuni gestori, individuando criteri operativi sufficientemente generali da poterli attuare senza necessità di revisioni sostanziali dei sistemi stessi. L'efficacia di un sistema di gestione delle infrastrutture dipende in modo sostanziale dalle funzioni che sono implementate nei sistemi di gestione dei dati e delle informazioni (Bridge Management Systems – BMS) relative alla sorveglianza [3].

In termini generali, un BMS è uno strumento di supporto alla gestione che consiste nell'inventario delle opere, nell'archiviazione di dati e informazioni che provengono dalle ispezioni e dalle altre forme di monitoraggio, in modo da fornire indicazioni sulle manutenzioni, sui miglioramenti e sull'ottimizzazione della collocazione delle risorse secondo principi di priorità e di urgenza in relazione all'applicazione delle Linee Guida.

In questo capitolo saranno analizzate le principali cause di degrado dei ponti esistenti. Seguendo il filo conduttore delle Linee Guida, successivamente, saranno approfondite le caratteristiche del sistema di sorveglianza dei ponti esistenti e i dettagli riportati nel documento in merito alle ispezioni visive, strumento operativo per la gestione dei ponti. Quanto analizzato sarà poi inquadrato nel più ampio sistema di gestione dei ponti (BMS) ponendo l'accento sui modelli di previsione del degrado e sulla loro modalità di realizzazione più diffusa, ossia le catene di Markov.

3.2 Le principali cause del degrado nei ponti

I ponti sono soggetti ad un invecchiamento dovuto all'utilizzazione, nonché a fattori ambientali esogeni. Le cause che determinano il deterioramento dei ponti possono essere attribuite a molteplici e concomitanti fattori; una prima distinzione si può operare tra i difetti che sono legati alla struttura vera e propria (quindi specifici di un singolo ponte o anche, e più frequentemente, di una determinata tipologia), da quelli dovuti a fattori esterni [19].

Tra i principali difetti intrinseci ci sono [19]:

- il naturale invecchiamento dei materiali e gli effetti del tempo ossia ritiro, fluage, rilassamento e la fatica;
- i difetti che derivano da eventuali carenze progettuali ossia errori di calcolo o di impostazione, mancata progettazione dei particolari o sottovalutazione di difficoltà realizzative;
- i difetti dovuti a cattiva esecuzione che dipendono dalla qualità dei materiali utilizzati non rispondenti alle specifiche progettuali e dalla loro non corretta messa in opera come, ad esempio, un'incompleta stagionatura, l'errato rapporto acqua/cemento, un'insufficiente vibrazione, oppure difetti geometrici come i posizionamenti errati degli appoggi e misure del copriferro non rispettate.

Tra i fattori esterni si possono citare i difetti dovuti all'ambiente circostante l'opera e quelli provocati da eventi accidentali. Le azioni esterne sono [19]:

- di tipo fisico/meccanico, ad esempio, variazioni termiche, dilavamenti ed erosioni, vento, cicli di gelo/disgelo, sovraccarichi, sollecitazioni dinamiche ripetute;
- di tipo chimico, legate all'azione dell'atmosfera o delle sostanze nocive, in particolare i sali antigelo, con le quali la struttura entra in contatto e che alterano le caratteristiche dei materiali, generando carbonatazione, dissoluzione del conglomerato cementizio, corrosione delle armature, ecc.;
- gli eventi accidentali di tipo naturale e quelli causati dall'uomo come ad esempio gli incidenti.



Figura 3.1: Esempio di fenomeni di degrado in un graticcio [20].



Figura 3.2: Visione ravvicinata di cavi da pretensione corrosi [20].

3.3 Il sistema di gestione dei ponti definito dalle Linee Guida

Il processo di deterioramento dei ponti deve essere adeguatamente controllato attraverso un sistema di sorveglianza adottato dagli Enti gestori in modo da garantire il corretto funzionamento dell'opera [3].

3.3.1 Il sistema di sorveglianza

Il sistema di sorveglianza rappresenta il complesso delle attività di controllo, ispezione e monitoraggio sulle opere d'arte che il gestore di una rete infrastrutturale deve svolgere allo scopo di assicurare la disponibilità, la funzionalità e il mantenimento delle condizioni di sicurezza dell'infrastruttura stessa [3]. Le attività definite dal sistema di sorveglianza si collocano successivamente alla classificazione o all'aggiornamento della Classe di Attenzione secondo la procedura descritta nel Livello 2 dell'approccio multilivello, come mostrato nel seguente diagramma di flusso.

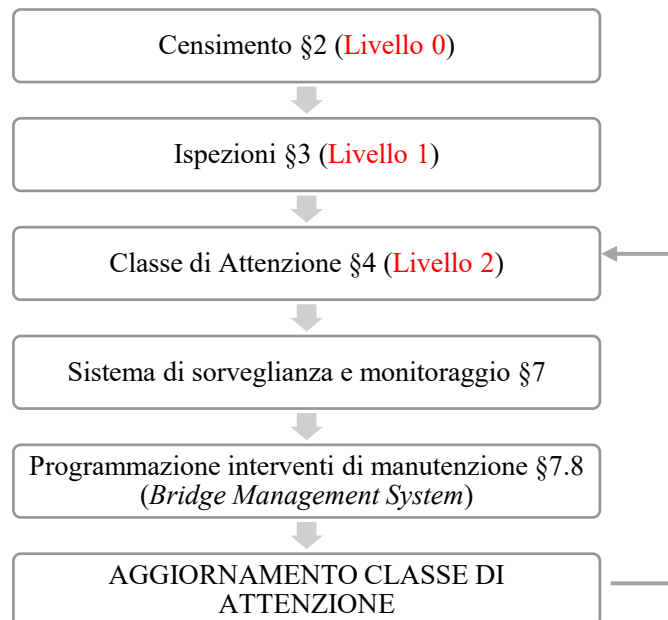


Figura 3.3: Relazione tra i livelli di analisi dell'approccio multilivello.

Le attività e gli strumenti operativi del sistema di sorveglianza comprendono:

- le ispezioni ordinarie e straordinarie,
- l'esecuzione di test statici e dinamici occasionali,
- l'installazione di sistemi di monitoraggio strumentale in modalità periodica o permanente.

La definizione della strategia secondo la quale strutturare le attività di sorveglianza e monitoraggio sono definite secondo un approccio cosiddetto “*risk – based*” [3]. In altre parole, la

tipologia di attività da svolgere nell'ambito della sorveglianza è determinata a partire dalla Classe di Attenzione al Livello 2 come definito nel precedente capitolo e mostrato nella figura successiva.

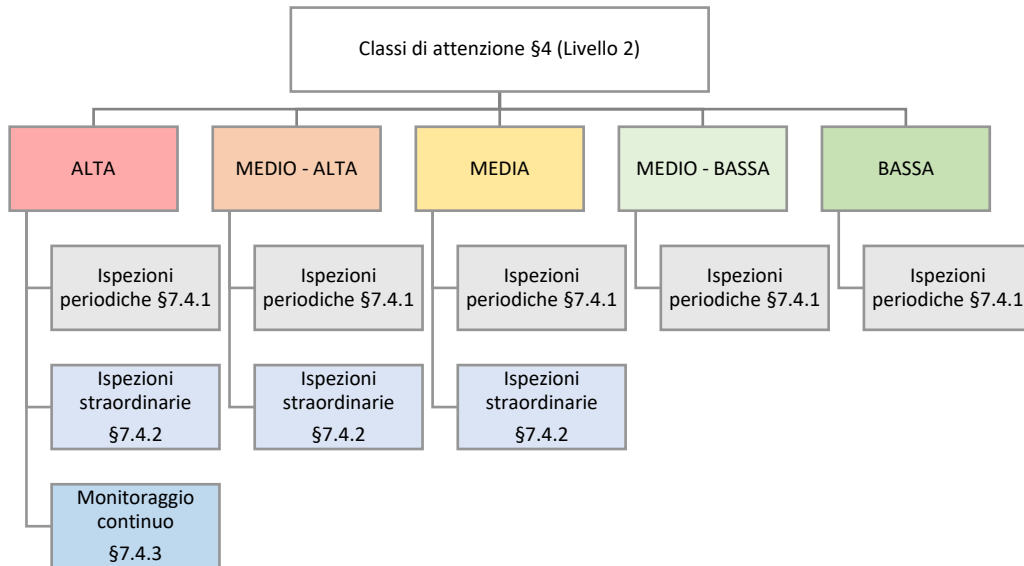


Figura 3.4: Strategia "risk-based": tipologia delle attività di sorveglianza da svolgere in funzione della CdA.

Di seguito verranno descritte le tipologie delle attività di sorveglianza, ossia le ispezioni, le prove di carico statiche e dinamiche e il monitoraggio strutturale.

Le ispezioni

Le ispezioni visive hanno come primo obiettivo la determinazione delle condizioni generali dell'opera che possono essere valutate mediante semplici misure e probe non distruttive [8]. Come si può vedere dalla figura precedente, le linee guida distinguono due tipologie di ispezioni, ordinarie e straordinarie.

Le ispezioni ordinarie sono periodiche e documentate con le schede modello riportate nell'allegato B della norma e successivamente registrate nel BMS. Inoltre, le opere da ispezionare sono distinte in due tipologie: Tipo 1 per le opere già inserite in un sistema di sorveglianza conforme alla Circolare n° 6736/61/AI del 1967; Tipo 2 per le opere nuove o in esercizio per le quali non sono state effettuate le ispezioni periodiche di cui alla Circolare sopra citata e che quindi non sia noto lo stato conservativo/manutentivo [3].

Nella seguente tabella sono riportate le frequenze minime con le quali eseguire le ispezioni ordinarie in funzione della Classe di Attenzione e della tipologia di opera.

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

Figura 3.5: Frequenza minima delle ispezioni ordinarie [3].

In particolare, in una nota delle Linee Guida si osserva che la Circolare n° 6736/61/AI del 1967 prevedeva per tutti i ponti della rete stradale italiana l'esecuzione di ispezioni trimestrali. Tuttavia, tale frequenza non trova corrispondenza nelle normative e nelle prassi internazionali, che prevedono frequenze più basse e quanto meno annuali [3]. Inoltre, i fenomeni di degrado si sviluppano in tempi generalmente lunghi e, dunque, la frequenza trimestrale appare non utile nel caso generale. Pertanto, sia per ragioni di continuità che in considerazione dell'età avanzata della maggior parte dei ponti e dei viadotti esistenti sul territorio nazionale, si ritiene opportuno conservare la frequenza trimestrale per le sole opere classificate in Classi di Attenzione Medio-Alta e Alta, ove peraltro è prevista, ove possibile, l'installazione di un sistema di monitoraggio periodico o continuo [3]. Le ispezioni sono condotte visivamente e con l'ausilio di semplici strumenti, quali martelli, strumenti di misura delle lunghezze, sensori portatili. È possibile effettuare test non distruttivi come prove sclerometriche, misure di spessori di protezione, misure di umidità e pH (anche mediante applicazione di soluzione di fenolfaleina), misure di potenziale elettrico [3].

Le ispezioni straordinarie, invece, sono documentate in specifici Rapporti che saranno successivamente registrati nel BMS [3]. A differenza di quelle ordinarie sono più approfondite e da compiersi non oltre un determinato intervallo di tempo. Infatti, hanno lo scopo di acquisire informazioni utili ad approfondire la conoscenza dei fenomeni di degrado e della condizione strutturale dell'opera quando le ispezioni ordinarie abbiano riscontrato criticità evidenti e urgenti andando a concentrarsi in particolar modo sui difetti evidenziati. Possono essere accompagnate da prove non distruttive come [3]:

- prelievo di campioni per prove meccaniche e chimico-fisiche,
- prove sclerometriche, sonreb (con carotaggi di calibrazione, come da documenti di riferimento) o equivalenti,
- prove di pull-out,
- prove ultrasoniche o georadar per rilevamento di vuoti e discontinuità,
- mappature di potenziale elettrico,
- sondaggi e ispezioni con endoscopio,
- prove magnetiche e/o georadar sui cavi di precompressione,
- misure diffuse di umidità e pH,
- Determinazione dello stato di tensione.



Figura 3.6: Ispezione straordinaria di una pila tramite discesa in corda doppia [20].

Le prove di carico statiche e dinamiche

Prove di carico statiche e rilievi della risposta dinamica possono essere eseguiti in concomitanza con le ispezioni straordinarie o indipendentemente da esse, qualora se ne ravvisi l'opportunità o la necessità, ad esempio a seguito di interventi di manutenzione straordinaria anche qualora il collaudo non fosse richiesto dalla normativa [3]. Le prove possono essere condotte in analogia con quanto prescritto al Capitolo 9 delle NTC2018 [18].

Gli obiettivi delle prove sono i seguenti [3]:

- confrontare i valori di spostamenti, deformazioni e caratteristiche dinamiche ottenuti dalle misure con i risultati di modelli per una loro validazione;
- aggiornare i parametri dei modelli ai risultati delle prove per renderli aderenti al comportamento reale.



Figura 3.7: Prove di carico sui ponti.

Il monitoraggio strumentale

Un ulteriore strumento operativo di sorveglianza è il monitoraggio strumentale. Le metodologie di monitoraggio strumentale (*Structural Health Monitoring*) si basano sull'installazione per periodi di tempo abbastanza lunghi (diversi mesi o anni) o per l'intera vita operativa di una struttura, di reti di sensori gestiti da sistemi hardware/software che consentono di acquisire i dati provenienti dai sensori e di elaborarli in modo automatico o semiautomatico, identificando attraverso opportuni algoritmi la presenza di malfunzionamenti [3]. Rispetto al

sistema di manutenzione tradizionale, il monitoraggio strumentale si comporta come un sistema intelligente in grado di comunicare con l'operatore umano e segnalare tempestivamente la presenza di difetti o situazioni pericolose non osservabili [3].



Figura 3.8: Esempio di sensori accelerometrici per il monitoraggio strumentale.

Uno dei vantaggi nell'applicazione di tecniche SHM è l'utilizzo delle informazioni da essi ottenuto per orientare le ispezioni ordinarie e straordinarie [3].

3.3.2 I metodi di valutazione del degrado per la manutenzione dei ponti

La valutazione degli esiti delle ispezioni di livello 1 è impiegata ai fini della determinazione delle Classi d'Attenzione al livello 2. Le Linee Guida prevedono l'utilizzo dei modelli di schede per le ispezioni ordinarie al livello 1 per definire un indice numerico rappresentativo della condizione dell'opera.

Di seguito verranno confrontati due metodi adottati dagli enti proprietari di ponti in Italia per l'attribuzione di un indice numerico caratteristico del degrado. In particolare, si confronteranno il metodo basato sul manuale dal titolo "Manutenzione programmata delle opere d'arte stradali" e il metodo sviluppato dal CIAS, Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale, denominato metodo "Metodo di Valutazione Numerica" (MNV) ripreso dalle nuove Linee Guida.

A premessa, occorre sottolineare che qualunque sia il criterio adottato dalla metodologia ispettiva, non sempre i difetti potenzialmente riducenti la capacità portante possono essere individuati [8]. In particolare, nei casi di

- corrosione puntuale, dove l'elemento difettoso non si mostra e non produce effetti deformativi;
- fenomeni degradanti non visibili, come la riduzione dello stato tensionale dei cavi di post o precompressione;
- mancanza di fondazioni adeguate che garantiscano, anche a fronte di eventi meteorologici pesanti, una adeguata capacità resistente delle pile e delle spalle [8].

Manuale della manutenzione programmata delle opere d'arte stradali

Gli Enti gestori della maggior parte delle opere infrastrutturali in Italia utilizza il metodo ispettivo basato sul manuale "Manutenzione programmata delle opere d'arte stradali". Il metodo è definito soggettivo [8] in quanto, come riportato specificatamente nel manuale, "ogni Ispettore

ha un suo modo di operare: c'è chi opera per singola parte strutturale e chi per campata, chi cerca di riportare tutto effettuando una sola "passata" e chi effettua più passaggi; chi riporta i difetti uno per uno riservandosi poi di assemblarli e chi usa tutto quando ha terminato l'ispezione. Ci si può limitare a consigliare il metodo seguente che consiste in due 'passate' da sotto: la prima per individuare i difetti (indipendentemente dalla parte strutturale in cui compaiono), la seconda per riassumere le estensioni; ed una da sopra. Se esistono scalette di accesso durante questa 'passata' ci si cala sui pulvini [8]."

In particolare, per ciascun difetto, presente in un catalogo, viene attribuito un voto per valutare la gravità del degrado riscontrata in sede di ispezione in rapporto al difetto e, in particolare [8]:

- alla riduzione che può indurre sul coefficiente di sicurezza;
- alla sua evoluzione nel tempo;
- l'importanza della parte strutturale in cui si manifesta.

I valori da attribuire partono da 10 e arrivano ad un massimo di 70. Sono così definiti [8]:

- 10: il difetto non si evolve in altri difetti;
- 20: il difetto si può evolvere in altri difetti che non richiedono interventi;
- 30: il difetto si può evolvere in altri difetti che richiedono interventi.
- I voti da 40 a 60 sono per difetti che richiedono interventi programmabili:
 - 40: il difetto necessita di un intervento a medio lungo termine;
 - 50: il difetto necessita di un intervento a medio-breve termine;
- 60: il difetto ha influenza sulla statica, ma riduce in maniera non significativa i coefficienti di sicurezza, necessita di un intervento a breve termine.
- 70: il difetto provoca una riduzione dei coefficienti di sicurezza.

Di seguito si riporta il diagramma logico che viene utilizzato in campo dagli ispettori per l'attribuzione dei voti.

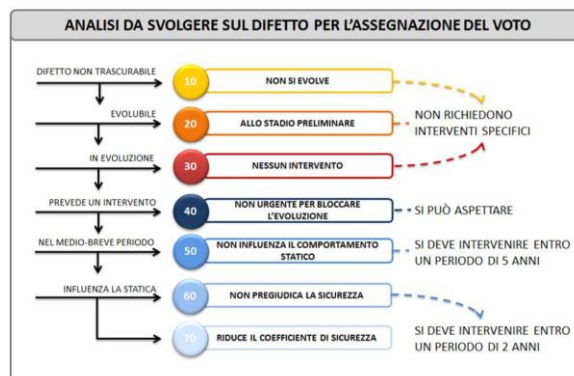


Figura 3.9: Analisi da svolgere per l'assegnazione del voto [8].

Metodo della valutazione numerica (MVN)

La procedura ispettiva descritta nel "Manuale per la Valutazione dello Stato dei Ponti" pubblico dal CIAS è basata sul metodo della valutazione numerica (MVN). A differenza del

metodo precedente, la procedura è ripetibile [5], [8] poiché si basa su una valutazione numerica che definisce l'intensità e l'estensione dei singoli difetti. Il manuale propone delle schede utilizzate per attribuire un indicatore numerico allo stato di degrado.

Ogni scheda riporta un elenco dei difetti tipici suddivisi per elemento del ponte e materiale. In particolare, le schede distinguono 101 difetti per le varie tipologie di elementi e materiali costituenti l'opera ispezionata. Si considerano i seguenti elementi e i seguenti materiali [5]:

- Spalle – calcestruzzo, muratura;
- Pile – calcestruzzo, muratura, acciaio;
- Giunti;
- Piedritti – calcestruzzo, acciaio;
- Archi – calcestruzzo, muratura, acciaio;
- Travi e traversi – calcestruzzo, acciaio, legno;
- Soletta – calcestruzzo, legno;
- Elementi accessori.

DISTACCO DEL COPRIFERRO				1.5	
G	Estensione K_1			Intensità K_2	
	0,2	0,5	1	0,2	0,5
2	Appena presente	~ 50% della superficie	~ tutta la superficie	Sempre = 1	





DESCRIZIONE
 È un difetto che si manifesta inizialmente con lesioni parallele agli spigoli o in corrispondenza con i ferri d'armatura. Successivamente si determina il distacco parziale o totale del copriferro con messa a nudo dell'armatura.

CAUSE
 Il deterioramento del copriferro deriva dal suo esiguo spessore, dalla cattiva qualità del conglomerato, da una concentrazione di armatura (caso interferito), dal fenomeno della carbonatazione. L'aria, penetrando all'interno del conglomerato, permette l'ossidazione dell'armatura producendo un aumento di volume e la conseguente espulsione del copriferro.

CORRELAZIONI
 Cfr. *diagnostica armato* - 1.3, *Vespai* - 1.4, *Armatura ossidata* - 1.6, *etc.*

INTERVENTI
 Rimozione del calcestruzzo ammalorato attraverso l'uso di una idropulitrice ad acqua in pressione fino ad eliminare le parti laceranti o in fase di distacco. Sostituzione delle parti di armatura che presentano una significativa insufficienza. Trattamento dell'armatura a vista, dopo la necessaria pulizia meccanica, mediante l'applicazione a pennello di malta cementizia anticorrosiva, applicata a due mani, ed atta a riportare il pH a 12. Il prodotto utilizzato dovrà avere una adesione minima di 1,8 N/mm² ed un pH dell'impasto pari a 12,6. Ricostruzione del copriferro prevedendo una delle alternative sotto indicate:
 - con malta cementizia mono o bicomponente, fibrorinforzata a ritiro compensato da applicare a cannoletta od a spruzzo, con forte adesione al supporto (≥ 2 N/mm²), buona traspirabilità al vapore acqueo, resistente alla penetrazione del CO₂ e dei sali cloruri, contenente sinergie multiple anticorrosione ed inibitori di corrosione migratori organici. Resistenza meccanica a compressione da 38 a 55 MPa, resistenza meccanica a flessione da 7 a 11 MPa e modulo elastico modulabile da 8000 a 24000 Mpa, secondo le esigenze progettuali;
 - con malta o betoncino cementizio fibrorinforzato a ritiro compensato da colare in cassero o in situazioni confinate, con forte adesione al supporto (≥ 2 N/mm²) ed al fondino d'acciaio (pull out ≥ 20 N/mm²), con buona traspirabilità al vapore acqueo, resistente alla penetrazione del CO₂ e dei sali cloruri, contenente sinergie multiple anticorrosione ed inibitori di corrosione migratori organici. Resistenza meccanica a compressione da 65 a 90 MPa, resistenza meccanica a flessione da 7,5 a 11 MPa, modulo elastico modulabile da 26000 a 34000 Mpa, secondo le esigenze progettuali.

NOTE
 Indagini:
 Riferimenti bibliografici:

Figura 3.10: Esempio di una scheda di descrizione del difetto (MVN) [5].

A ciascun difetto è associato [21]:

- un peso G rappresentato da un numero che varia da 1 a 5, dal difetto meno grave al difetto più grave. In particolare, il peso deve considerare la gravità derivante dalle seguenti considerazioni:
 - a) costituire un pericolo (rischio attuale);
 - b) possibilità di ridurre le capacità portanti (rischio potenziale);
 - c) costituire un innesco di altri difetti (rischio indotto);
 - d) alto onere economico di ripristino (rischio economico)

Il peso $G=5$ è stato affidato solo a difetti dove è presente anche solo una delle condizioni a o b. Ai pesi 4 e 5 sono associati i difetti che richiedono l'esecuzione di un rilievo accurato in quanto potrebbero insorgere immediati e rilevanti problemi strutturali;
- un coefficiente k_1 che indica l'estensione del difetto (da 0.2 a 1);
- un coefficiente k_2 che indica l'intensità del difetto (da 0.2 a 1);
- il numero delle foto effettuate al difetto;
- la casella NC per indicare le non conformità;
- la casella AP se è necessario adottare azioni preventive;


Schede di valutazione		01.A.009 P. SS16 - via G. Savini					
N° campate	3						
Lunghezza [m]	82,50						
Larghezza [m]	12,00						
NG = 5	3						
Non Conformità (NC)	1						
Azioni Preventive (AP)	0						
D _R	27						
D _A	173						
Completamento %	100						
Data ispezione	11/11/2014			EL01A-0008			
Spalle		Materiale: calcestruzzo	D _{max} = 64	N° elementi: 2			
N° Foto	Visto	Difetto	G	K1	K2	NC	AP
	X	1.1) Macchie di umidità passiva	1	0,0	0,0		
1	X	1.2) Macchie di umidità attiva	4	1,0	1,0		
2	X	1.3) Cfs dilavato/ammalorato	2	0,5	1,0		
	X	1.4) Vespai	2	0,0	0,0		
3	X	1.5) Distacco del copriferro	2	0,2	1,0		
4	X	1.6) Armatura ossidata	5	0,2	0,2		
	X	1.13) Lesioni a ragnatela modeste	1	0,0	0,0		
	X	1.14) Fessure orizzontali	2	0,0	0,0		
5,6	X	1.15) Fessure verticali	2	0,2	0,2		
	X	1.16) Fessure diagonali	5	0,0	0,0		
	X	1.25) Riprese successive deteriorate	1	0,0	0,0		
	X	1.29) Danni da urto	4	0,0	0,0		
	X	1.30) Danni causati dagli app. d'appoggio	4	0,0	0,0		
	X	5.1) Fuori piombo	5	0,0	0,0		
	X	5.2) Scalzamento	5	0,0	0,0		
	X	5.3) Dilavamento del rilevato	1	0,0	0,0		
	X	5.4) Dissesto del rilevato	2	0,0	0,0		
	X	5.5) Difetti app. d'appoggio in neoprene	4	0,0	0,0		
	X	5.6) Difetti pendoli	4	0,0	0,0		
	X	5.7) Difetti carrelli	4	0,0	0,0		
	X	5.8) Difetti app. d'appoggio compositi	4	0,0	0,0		
	X		0	0,0	0,0		
Eventuali note							

Figura 3.11: Scheda di valutazione numerica dello stato di degrado del ponte (MVN) [5]

Nell'intestazione di ogni scheda sono riportati:

- La localizzazione del ponte nell'intestazione della scheda;
- Gli elementi a cui la scheda è riferita (N);

- La data di ispezione e i riferimenti dell'ispettore.

Dalla combinazione dei parametri sopracitati, viene definita Difettosità Relativa, D_R , il valore finale della valutazione fatta per singoli elementi strutturali che rappresenta l'indice dello stato di degrado, dove

$$D_R = \sum G \times K_1 \times K_2 \quad (3.1)$$

È definita Difettosità Assoluta, D_A , il numero derivante dalla sommatoria dei difetti moltiplicati per il numero N dei singoli elementi strutturali[21]:

$$D_A = \sum N \times G \times K_1 \times K_2 \quad (3.2)$$

Tale valore ha assunto, nell'evoluzione ed applicazione pratica del sistema di controllo, anche una significativa valenza prettamente economica, dato che rappresenta un indice utile per stimare l'onere per un risanamento tecnologico [21].

Dal confronto tra le due metodologie ispettive si evince la forte differenza concettuale: nel primo caso l'ispezione "soggettiva" richiede all'operatore di valutare sia lo stato di degrado e, pertanto, l'ispettore si assume soggettivamente la responsabilità decisionale per assicurare un potenziale intervento sull'opera; nel secondo caso l'ispezione "oggettiva" rappresenta una "misura" dello stato di degrado e, dunque, ne risulta un rapporto esaustivo, ripetibile e facilmente comprensibile anche in una fase successiva di lettura, grazie anche ad una relazione accompagnata da fotografie e descrizioni rigorose dei difetti [8].

3.3.3 Gli indicatori numerici del degrado secondo le Linee Guida

Si può riscontrare l'analogia tra il metodo appena descritto proposto dal CIAS e il metodo ispettivo proposto nel Livello 1 delle Linee Guida, già descritto nel primo capitolo [22]. Le Linee Guida, infatti, riprendono il Metodo della Valutazione Numerica (MVN) proponendo sulla base delle schede di valutazione degli ispettori (Allegato B – Schede di difettosità) un indice numerico dato dello stato di condizione dell'opera dalla combinazione dei parametri rilevati dal Livello 1 (G , k_1 e k_2). In particolare, analogamente al MVN, si definisce il valore di difettosità relativa come

$$D_R = \sum G \times K_1 \times K_2 \quad (3.3)$$

e può essere determinato per ciascun elemento di opera, per gruppi omogenei di essi o per l'intero ponte [3]. Gli indicatori numerici dello stato di condizione, come la difettosità relativa D_R , forniscono una rappresentazione di tale stato in un certo istante di tempo nella vita di servizio dell'opera.

Per estendere il risultato all'intera vita utile del ponte ispezionato, infatti, possono essere costruiti i modelli prognostici di degrado a partire dagli indicatori numerici dello stato di condizione. I modelli prognostici consentono di formulare previsioni dell'andamento del degrado a breve-medio termine e quindi di fornire preziose informazioni sulla probabile vita operativa

residua dell'opera [3]. In particolare, il modello prognostico fornisce la possibilità di stabilire i limiti e intervalli di valori numerici cui associare:

- le soglie di attenzione e allarme;
- corrispondenze con le Classi di Attenzione, allo scopo di attualizzarle periodicamente [3].

Soglie di attenzione e di allarme

Sulla base delle curve di degrado si possono definire preventivamente (ed eventualmente aggiornare con l'aumento della conoscenza dei fenomeni di degrado) delle soglie di attenzione e di allarme come descritto nel § 7.7.2 delle Linee guida [3], in corrispondenza delle quali dovranno essere attivate le procedure più opportune: ad esempio, il raggiungimento o il superamento della sola soglia di attenzione può comportare la ripetizione delle ispezioni e dell'analisi dei dati del monitoraggio, ovvero un aumento della loro frequenza, per verificare se la deviazione dalle risultanze del modello predittivo sia o meno stabile [3].

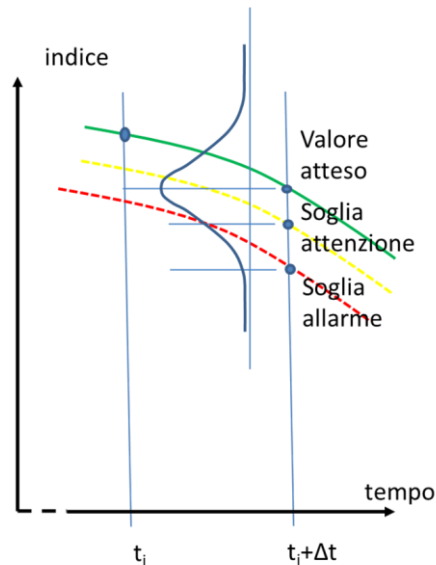


Figura 3.12: Soglie di attenzione e di allarme [3]

I limiti possono essere definiti in termini percentuali rispetto al valore atteso oppure, se è data la distribuzione di probabilità dei valori dell'indicatore al tempo $t_i + \Delta t$, da opportuni frattili.

Aggiornamento della Classe di Attenzione

In corrispondenza di ogni ispezione ordinaria o straordinaria viene eseguito un aggiornamento della Classe di Attenzione. Tale aggiornamento può essere condotto ripetendo la procedura descritta nel § 4 delle Linee Guida [3], oppure, tramite l'adozione di curve di degrado di riferimento che consentono di definire criteri alternativi di tipo quantitativo, in funzione del valore dell'indice che rappresenta lo stato di condizione.



Figura 3.13: Classi di Attenzione in funzione dello stato di condizione [3]

La corrispondenza tra gli intervalli di valore dell'indice dello stato di condizione indicati nella figura precedente e le Classi di Attenzione può essere definita in vario modo: ad esempio, correlando in modo opportuno l'indice riportato in figura sull'asse delle ordinate alla Difettosità relativa D_R , la classe bassa potrebbe farsi corrispondere ai valori dell'indice per cui $D_R < 5$ e la classe alta ai valori per cui $D_R > 25$ [3]. Il campo intermedio potrebbe essere suddiviso in intervalli eguali del valore dell'indice oppure, utilizzando la curva di degrado di riferimento per la tipologia di ponte in esame, in intervalli corrispondenti a periodi eguali di vita operativa, compresi fra l'età della costruzione cui corrisponde il valore limite della prima classe (bassa) e quella cui corrisponde il valore limite della penultima (medio alta) [3].

3.3.4 Gli esiti delle ispezioni visive e il BMS

Dalle applicazioni dei risultati delle ispezioni visive appena illustrate risulta evidente che l'uso dei modelli di degrado è vario poiché, oltre a consentire la previsione dell'evoluzione del degrado stesso, essi possono essere utilizzati nella ottimizzazione della pianificazione degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria (oppure preventiva e correttiva) come appena descritto [3].

Pertanto, gli esiti delle ispezioni visive si collocano alla base del supporto alle decisioni degli interventi di manutenzione da svilupparsi poiché vanno a costituire il database successivamente elaborato dal *Bridge Management System* (BMS) adottato dall'Ente gestore.

3.4 *Bridge Management System* (BMS) e modelli di previsione del degrado

Come analizzato nel paragrafo precedente, in funzione dell'applicazione dei modelli di degrado, costruiti sulla base dei risultati del sistema di sorveglianza, può essere determinato lo stato di condizione del ponte ad un certo istante di tempo e la sua probabile evoluzione in modo tale da:

- definire quali decisioni assumere in funzione delle classi di attenzione attuali e tendenziali;
- per le situazioni che non richiedono interventi immediati specificare i criteri per pianificare le attività di manutenzione nel medio periodo.

Pertanto, per il necessario supporto alle decisioni, nonché per l'eventuale individuazione di comportamenti strutturali anomali, risulta necessaria l'interpretazione dei dati provenienti dalle ispezioni mediante idonei modelli interpretativi del degrado da considerarsi nel BMS, ossia il sistema di archiviazione ed elaborazione dei dati e per il supporto alle decisioni [9].

Il Sistema di Gestione dei Ponti, in inglese *Bridge Management System* (BMS), permette di costruire inventari e database di ispezione, prevedere futuri scenari di ammaloramento tramite l'utilizzo di modelli di deterioramento, e conseguentemente pianificare gli interventi di manutenzione, riparazione e riabilitazione strutturale in maniera ottimale [4]. Alcuni studi sono confluiti in software commerciali che facilitano la gestione della manutenzione rendendo alcuni processi automatizzati [14].

3.4.1 Caratteristiche dei sistemi di gestione dei ponti

Sono stati realizzati diversi sistemi di gestione dei ponti a livello internazionale. Tuttavia, nonostante le differenze tra i diversi BMS realizzati da vari Paesi, i sistemi di gestione dei ponti presentano delle caratteristiche comuni. Infatti, i principali componenti di un moderno BMS sono [4]:

- La piattaforma di archiviazione dei dati;
- Il modello di stima dei costi di manutenzione;
- Il modello di previsione del deterioramento;
- IL modello ottimale di allocazione delle risorse economiche.

Nel grafico seguente è riportato lo schema generale del processo di gestione dei ponti, a partire dai risultati del sistema di sorveglianza fino alla decisione ottimizzata sugli interventi da eseguire.

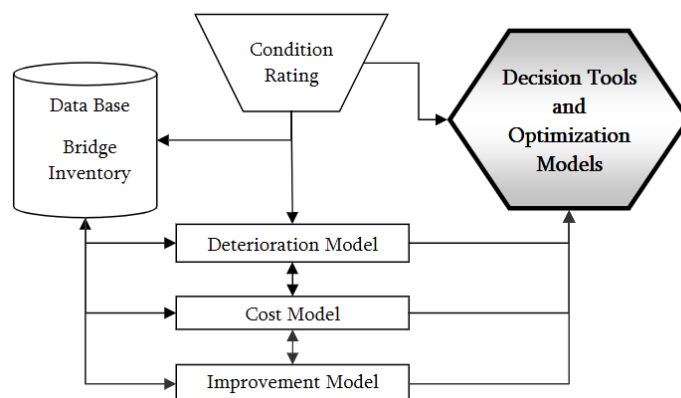


Figura 3.14: Componenti del Bridge Management System [23]

In particolare:

1. La piattaforma di archiviazione dati serve a raccogliere tutte le informazioni utili per una corretta gestione dei ponti sia relative al censimento che agli esiti delle ispezioni ai ponti e viadotti;
2. Tramite gli esiti di una visita ispettiva è possibile effettuare una prima stima dei costi di manutenzione per il ripristino di un ponte. La stima di costo degli interventi manutentivi necessari dipende quindi dallo stato di ammaloramento del ponte, e viene effettuata tramite l'utilizzo di un modello di stima dei costi di manutenzione. Un modello di stima dei costi si basa sulla definizione di protocolli di intervento manutentivo per le varie tipologie strutturali presenti e per ciascuno dei possibili stati di ammaloramento riscontrabili.
3. È possibile effettuare delle previsioni su base statistica del trend di deterioramento. Utile per pianificare intervalli temporali delle future ispezioni. Permette anche di effettuare valutazioni strutturali se si esprime in termini di sollecitazione/resistenza la relazione tra traffico e capacità portante del ponte in funzione del livello di deterioramento e stimare l'incremento di vita residua associabile a una parzializzazione del traffico;
4. Il modello di deterioramento unito a quello di stima dei costi permette di fare valutazioni anche economiche dei futuri costi di manutenzione, simulando la più probabile evoluzione dello stato di deterioramento dell'opera e conseguentemente stimandone i costi [4].

3.4.2 Panoramica dei sistemi di gestione dei ponti adottati dai vari Stati

Nei primi anni '90, in America si è adottato un BMS comune per tutti gli Stati ed implementato in due software: Pontis, per le analisi a livello di rete infrastrutturale, e Bridgit, per le analisi a livello di progetto [14]. Ciascuno Stato può scegliere il software da utilizzare in base al livello di gestione: Pontis è utilizzato per il *project – level* ossia a livello di opera da mantenere; Bridgit è impiegato al livello *network* ossia a livello di rete infrastrutturale.

I moduli principali dei due software BMS sono quattro [24]:

- *Database*: contiene l'elenco completo delle opere, i dati sulle loro condizioni, tutti le manutenzioni effettuate e i costi dell'utente;
- *Maintenance, repair, and rehabilitation (MR&R) module*: contiene i modelli di deterioramento e le funzioni di costo permette di scegliere la strategia di manutenzione con il minore impatto economico;
- *Improvement module*: tale modulo permette di indentificare le azioni di miglioramento in accordo con il modulo MR&R;
- *Integration module*: esso permette di combinare le informazioni riguardanti la manutenzione degli elementi del ponte e le informazioni riguardanti i miglioramenti tramite l'utilizzo di una analisi costo – benefici.

Di seguito è riportata una rappresentazione schematica delle componenti sopraelencate nella fattispecie per il software "Pontis" [24].

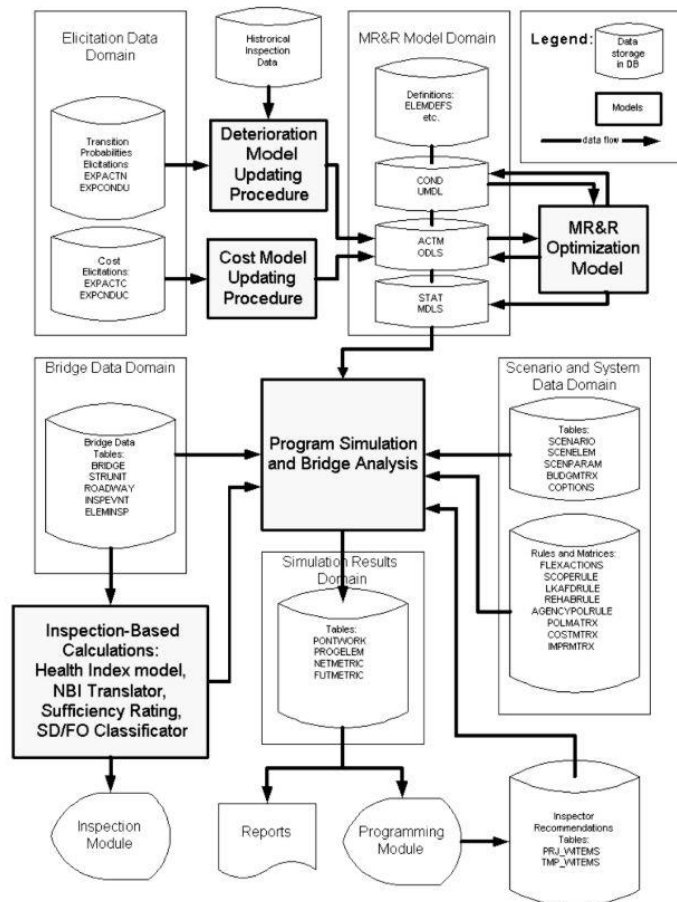


Figura 3.15: Componenti del BMS americano "Pontis"

In Europa, invece, ogni Stato utilizza il proprio sistema di gestione. Nel 1998 fu avviato un progetto di sviluppo di un sistema unificato per la gestione dei ponti a livello europeo chiamato BRIME (BRIDGE Management in Europe) [20]. A conclusione di tale progetto è stato redatto un report finale nel quale è delineato un sistema di gestione dei ponti che ha ispirato alcuni metodi sviluppati in Italia.

In Italia, dal 2002 è stata adottata una politica di decentramento che ha trasferito le competenze statali sulla gestione dei ponti a Regioni e Province. Pertanto, ogni Ente ha adottato una propria procedura. Un esempio di realizzazione del BMS in Italia è il sistema di gestione dei ponti della Provincia Autonoma di Trento. Il sistema è basato su [25]:

- un database;
- un sistema di procedure;
- modelli di calcolo.

I dati vengono aggiornati all'interno del database attraverso processi esecutivi regolati da procedure e supportati da strumenti informatici. Di seguito si riporta lo schema riassuntivo della procedura decisionale del BMS della Provincia autonoma di Trento.

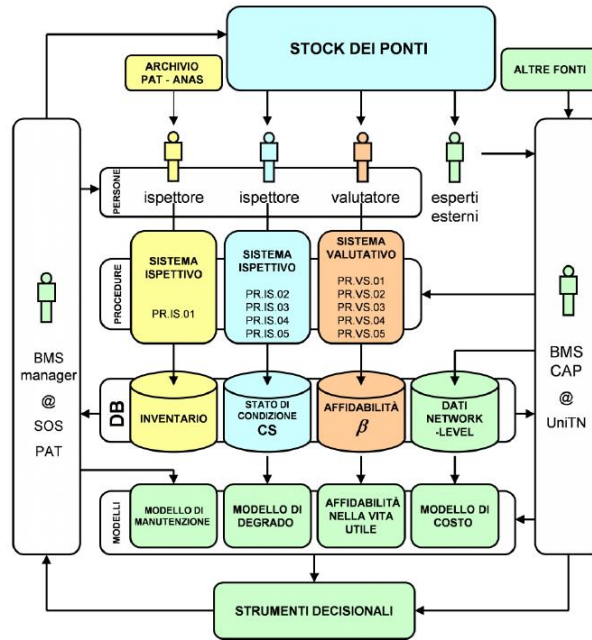


Figura 3.16: BMS della Provincia autonoma di Trento[25]

Un altro esempio di gestione delle infrastrutture è costituito dalla Società Autostrade per l'Italia SpA. Il controllo delle opere d'arte della rete in esercizio viene attuato per conto di Autostrade per l'Italia SpA da parte di Spea Engineering S.p.A. attraverso l'offerta di servizi integrati di ingegneria comprendenti, per tale ambito, la vigilanza e il controllo sistematico dello stato delle opere d'arte, inclusa l'esecuzione di prove strumentali e verifiche tecniche e la conservazione e aggiornamento degli schedari relativi a ciascuna opera d'arte, nonché la progettazione e la direzione lavori degli interventi di manutenzione [19]. La gestione delle opere d'arte viene effettuata attraverso l'utilizzo di una piattaforma BMS (Bridge Management System) che, prendendo a riferimento le banche dati aggiornate periodicamente, permette di organizzare l'attività di ispezione, indagine e manutenzione secondo definiti criteri di priorità [19].

Anche il CIAS, che ha realizzato il già citato Metodo della Valutazione Numerica, in collaborazione con la società 4 Emme S.p.A. ha sviluppato una piattaforma di gestione dei ponti chiamata weBridge [22]. La piattaforma è totalmente online, accessibile direttamente da web. Permette di eseguire il censimento e l'ispezione direttamente in sito con qualsiasi dispositivo ed in tempo reale i dati potranno essere validati dal responsabile della manutenzione in tempo reale. L'architettura del sito ricalca la metodologia multilivello così come delineato nelle nuove Linee Guida. Il software weBridge fornisce ai Gestori e alle Amministrazioni il supporto al processo decisionale che sta alla base della gestione dei ponti e della rete infrastrutturale e finalizzato a redigere piani di manutenzione ordinaria e straordinaria efficaci [22].

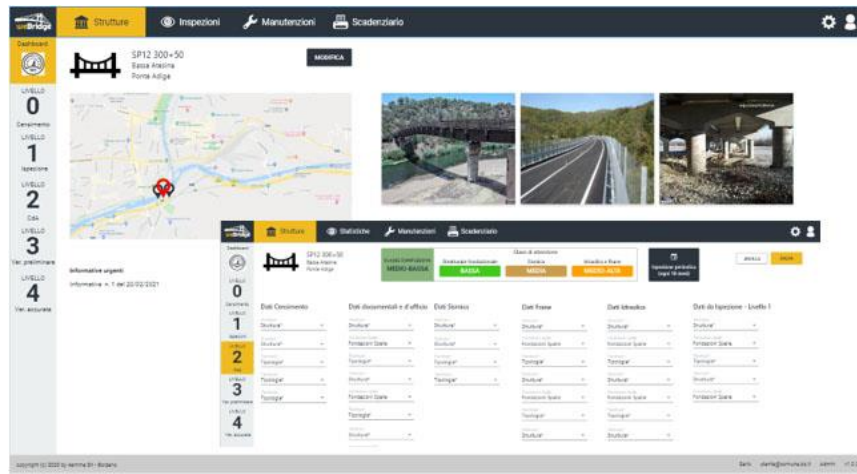


Figura 3.17: Homepage piattaforma weBridge [22].

3.4.3 I modelli di previsione del degrado nei BMS

Un aspetto critico per la gestione dei ponti è l'affidabilità con cui si predice il deterioramento delle strutture, in modo da selezionare le azioni ottimali e appropriate per ridurre o minimizzare la velocità di degrado e i costi di manutenzione. In figura si riporta una rappresentazione qualitativa del processo di degrado di un ponte nel tempo con il minimo livello di deterioramento accettabile a supporto del processo decisionale nell'ambito BMS.

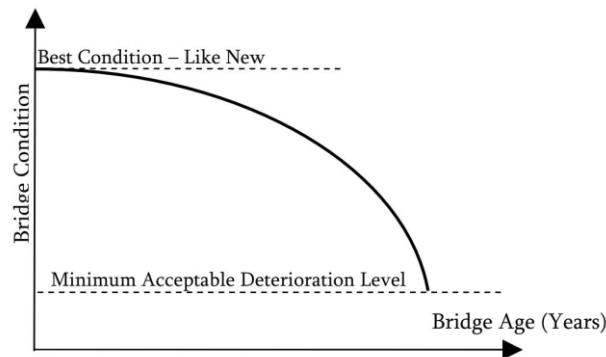


Figura 3.18: Processo qualitativo di degrado nel tempo di un ponte.

I modelli di deterioramento impiegati nel BMS possono essere distinti in [26]:

- Modelli meccanici, che descrivono il degrado del materiale a partire dallo stato tensionale e dall'ambiente in cui si trova la struttura; generalmente sono impiegati al *project – level* in quanto sono dettagliati per il singolo elemento dell'opera [27];
- Modelli deterministici, che prevedono lo stato di degrado del ponte ignorando, però, la natura stocastica del problema poiché assegnano parametri deterministici al modello valutati sulla base di regressioni; un esempio è il metodo proposto nella norma UNI EN 16991:2018 e citato anche dalle Linee Guida [3];

- Modelli stocastici, attraverso i quali si modella il deterioramento del ponte con una variabile casuale in modo da considerare l'aleatorietà del fenomeno implementando un modello più realistico.

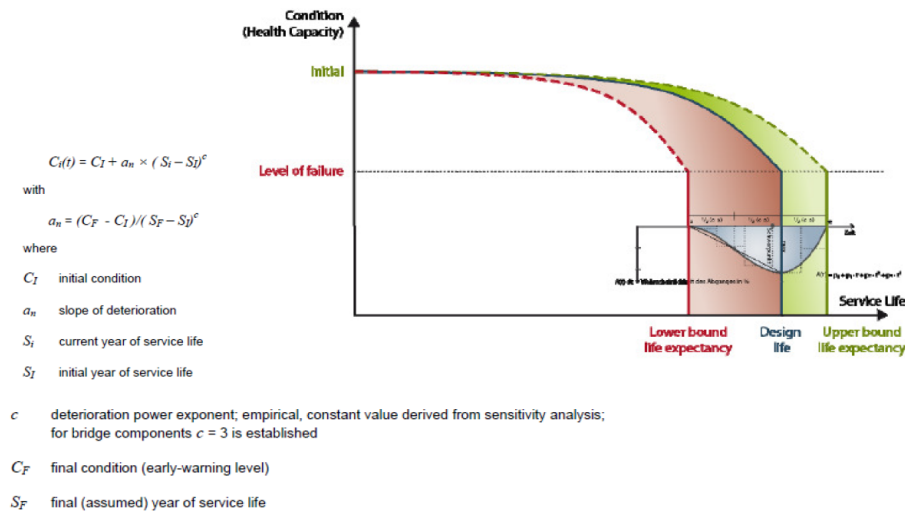


Figura 3.19: Modello deterministico per la curva di degrado proposta dalla norma UNI EN 16991:2018 e citata dalle Linee Guida [28].

Nella maggior parte dei sistemi di gestione dei ponti moderni, il modello più impiegato per valutare la performance è quello stocastico, basato sulle valutazioni della condizione del ponte e dei suoi elementi [29]. In particolare, il processo markoviano è il modello che è stato più comunemente implementato per predire il degrado delle opere stradali. Un'altra prospettiva adottata è la modellazione del deterioramento basata sulle ispezioni visive attraverso metodi di regressione.

3.5 Limitazioni del processo markoviano e dei metodi di regressione

In questo paragrafo sarà analizzato lo stato dell'arte dei principali approcci per determinare la predizione del degrado del ponte e dei suoi elementi nei BMS attraverso la catena di Markov e attraverso i metodi di regressione.

3.5.1 La catena di Markov per prevedere l'andamento del degrado

La catena di Markov è la metodologia più adottata per modellare il degrado e prevederne l'andamento nel tempo mediante un modello stocastico [30]. Alla base della catena di Markov vi è la matrice di probabilità di transizione. È dunque fondamentale per una corretta gestione della manutenzione dei ponti stimare realisticamente tale matrice [30].

Il processo di Markov descrive l'evoluzione nel tempo dei sistemi stocastici in cui lo stato futuro successivo dipende solamente dallo stato corrente [6]. Le componenti principali della

catena di Markov sono gli stati del sistema $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_X\}$ e l'insieme delle probabilità di transizione da uno stato all'altro definito dalla matrice

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1X} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{i1} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{iX} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{X1} & \dots & p_{Xj} & \dots & p_{XX} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Ogni componente $p_{ij} \in [0, 1]$ nella matrice rappresenta la probabilità condizionata di transitare dallo stato x_i al tempo t allo stato x_j al tempo $t + 1$, $p_{ij} = \Pr(x_j^{t+1} | x_i^t)$. Nel contesto della modellazione strutturale del degrado, ogni stato del sistema rappresenta uno stato di degrado da “eccellente” a “gravemente danneggiato”, come mostrato nella seguente figura.

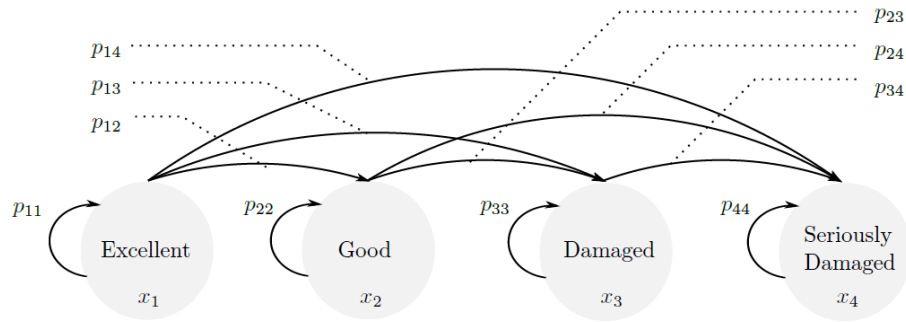


Figura 3.20: Stati del modello markoviano con le possibili transizioni nel modello di degrado rappresentate dalle frecce [6].

Si considera che:

- Il processo di degrado è monotono nel tempo;
- L'intervallo di tempo delle ispezioni è considerato di un anno, quindi, lo stato di degrado non può saltare un livello dal tempo t al tempo $t + 1$; per esempio, se lo stato corrente è “eccellente”, lo stato successivo dopo un intervallo di tempo Δt non potrà essere “seriamente danneggiato” [6].

Pertanto, la matrice di transizione è semplificata in:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} p_{11} & 1 - p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 1 - p_{22} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 1 - p_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

In letteratura si trovano numerosi studi riguardo alla stima della matrice di probabilità di transizione declinata per la particolare applicazione nel campo delle opere infrastrutturali. Di

seguito si presenteranno i lavori più rilevanti che propongono dei metodi diversi per definire la matrice di transizione [30].

Il lavoro di José J. Ortiz-García, Seósamh B. Costello, e Martin S. Snaith compara tre metodi per stimare la probabilità di transizione [31]. I metodi candidati sono testati su sei insiemi di dati sintetici. In particolare:

- Metodo A: utilizza direttamente i dati degli stati di condizione del sistema per selezionare le probabilità di transizione ottimali andando a minimizzare la somma delle differenze al quadrato tra ciascun punto del dataset e la condizione media calcolata;
- Metodo B: il secondo metodo utilizza curve di regressione sul dataset originale; l'obiettivo del metodo è minimizzare il quadrato della distanza tra la curva di regressione e la curva ricavata con la matrice di probabilità di transizione;
- Metodo C: assume nota la distribuzione delle condizioni nel tempo; la funzione obiettivo è la differenza tra la distribuzione nota e la curva ricavata con la matrice di probabilità di transizione.

Il metodo B è stato in parte ripreso dal lavoro di Morcouc [32]. Nel suo studio egli formulò un criterio usato per stimare la probabilità di transizione andando a minimizzare la seguente funzione obiettivo:

$$Y = \sum_t |C(t) - E(t)| \quad (3.6)$$

con le seguenti condizioni

$$\begin{aligned} 0 \leq p_{ij} \leq 1 & \quad i, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_j p_{ij} = 1 & \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dove $C(t)$ è il valore della condizione del sistema al tempo t basato sulle regressioni e $E(t)$ è il valore atteso al tempo t basato sulla catena di Markov utilizzando le probabilità di transizione stimate.

Un altro modo per stimare le probabilità di transizione è utilizzare il metodo della massima verosimiglianza espresso come [33]:

$$\mathcal{L}(p) = \sum_{i,j} N_{ij} \log(p_{ij}) \quad (3.8)$$

dove la funzione $\mathcal{L}(p)$ è la funzione log-verosimiglianza da massimizzare e N_{ij} è il numero di transizioni osservate dallo stato x_i^t e x_i^{t+1} .

Come si può riscontrare dai vari metodi appena descritti, essi hanno in comune la caratteristica di minimizzare le differenze tra la condizione osservata e prevista [30].

Ulteriori studi e approfondimenti mirano a migliorare le performance del modello basato sul processo markoviano. Sono modelli ibridi, definiti semi-markoviani, poiché prevedono la modifica della matrice di transizione e la definizione una matrice di transizione stocastica per incorporare l'incertezza epistemica e aleatori nel modello ossia l'incertezza correlata alla conoscenza del fenomeno ovvero l'incertezza delle osservazioni. Un esempio è l'approccio ibrido sviluppato da Zhang et al. [34] che inserisce un termine di errore ai termini diagonali della matrice di transizione Z

$$\epsilon \sim \text{Beta}(\alpha, \beta) \quad (3.9)$$

in questo modo da incorporare l'aleatorietà delle osservazioni nel processo markoviano[6]. Tuttavia, l'aleatorietà delle osservazioni può essere stimata con un modello di Markov nascosto (*Hidden Markov Model*, HMM) andando a stimare una matrice di osservazione per ogni osservazione [35]. Ciononostante, nella pratica, tale procedura è raramente implementabile poiché il carico computazionale diventerebbe oneroso [6].

3.5.2 I metodi di regressione per prevedere l'andamento del degrado

In letteratura, un'ulteriore prospettiva sulla modellazione del degrado basata sulle ispezioni visive è quella attraverso l'uso dei metodi di regressione [6].

L'obiettivo della regressione è modellare la relazione tra la risposta del sistema y ed uno o più attributi \mathbf{z} , ossia definire un modello come

$$\mathbf{y} = g(\mathbf{z}) \quad (3.10)$$

Il modello di regressione è costruito sulla base dell'insieme delle osservazioni così definito:

$$\mathcal{D} = \{(z_i, y_i), \forall i = 1: D\} \quad (3.11)$$

dove y_i è l'osservazione associata agli attributi $z_i = [z_1, z_2, \dots, z_Q]^T$. Sono state messe a punto numerose tecniche di regressione per risolvere i problemi di monitoraggio strutturale. Nell'ambito delle ispezioni visive, le reti neurali artificiali sono gli approcci più comuni (*Artificial Neural Network*, ANN) [6]. L'utilizzo delle reti neurali artificiali per le ispezioni visive è stato dimostrato in differenti studi. In particolare, se ne citano due:

- Huang nel suo studio ha utilizzato modelli ANN per predire il degrado di impalcati in calcestruzzo [36];
- Lee et al. hanno applicato un modello ANN per predire il degrado basandosi sul volume di traffico e sulla crescita della popolazione intorno all'area del ponte; il loro studio ha dimostrato che *non-bridges factor*, ossia fattori non direttamente correlati con il ponte, possono spiegare gli schemi di deterioramento del ponte, come presentato nella seguente figura [37].

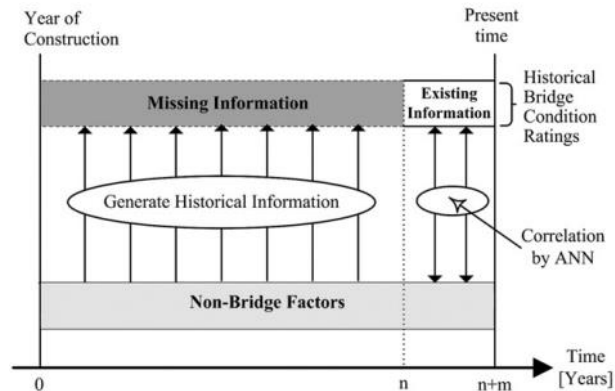


Figura 3.21: Backward Prediction Model (BPM) proposto da Lee et al. [37].

Tuttavia, dalla letteratura è emerso che l'applicazione dei modelli di regressione alle ispezioni visive è generalmente limitata rispetto all'applicazione dei modelli markoviani [6]. Infatti, i modelli di regressione richiedono molti dati. In altre parole, diventa difficile catturare la dipendenza temporale in serie temporali brevi assicurando un grado di previsione affidabile, così come si evince dai lavori di Foster et al. e Matkovskyy et al. [38], [39].

3.5.3 Svantaggi e limitazioni

I modelli basati sulle catene di Markov e sulle regressioni presentano alcune limitazioni nell'ambito dell'applicazione delle ispezioni visive e possono influenzare la performance complessiva del modello di degrado [6].

Innanzitutto, i modelli che adottano i processi markoviani da un lato sono facili da implementare e molto diffusi commercialmente, ma, dall'altro, presentano alcuni svantaggi riassunti nei seguenti punti [7]:

- Una delle più comuni limitazioni è la difficoltà di modellare l'incertezza epistemica, legata alla mancanza di conoscenza del fenomeno di degrado, e l'incertezza aleatoria legata alle osservazioni e, quindi, ai dati delle ispezioni; come già citato in precedenza il problema si può affrontare con l'uso di processi semi-markoviani [40] oppure con un modello di Markov nascosto [35], ma l'ammontare di dati richiesti rende la procedura onerosa dal punto di vista del calcolo computazionale;
- Il modello è discreto e approssima il processo fisico del degrado che, invece, è continuo nel tempo; questo conduce ad errori di approssimazione nella predizione del deterioramento futuro [7], [41];
- La velocità di degrado non può essere quantificata direttamente poiché necessita di una rappresentazione del degrado tramite un processo continuo [7];
- Un'ulteriore limitazione è la stazionarietà della matrice di probabilità di transizione dei modelli di Markov evidenziata nei lavori di Zambon et al. [6], [30], [42].

In secondo luogo, i modelli basati sulle regressioni, come precedentemente affermato, risultano limitati per costruire le curve di predizione del degrado a causa di alcune caratteristiche delle ispezioni visive. In particolare:

- Come già evidenziato, risulta difficile catturare la dipendenza temporale in serie temporali brevi assicurando un grado di previsione affidabile [38], [39];
- Il processo di *training* dai dati è *offline* [7], ciò vuol dire che non appena sono disponibili nuove osservazioni è necessario ripetere il processo di apprendimento del modello di degrado; in altre parole, non è possibile aggiornare la stima del degrado aggiungendo nuovi dati in una procedura *online*;
- Affinché la regressione sia di qualità è necessario avere un bilanciamento tra le osservazioni e le possibili risposte del sistema [6]; ciò vuol dire, nell'ambito delle ispezioni, avere una equa rappresentazione degli elementi strutturali a tutti i livelli di degrado, il che è inverosimile nella maggior parte delle situazioni reali.

3.6 Conclusioni

Nel capitolo è stato descritto nel dettaglio il sistema di sorveglianza definito dalle nuove Linee Guida per la gestione dei ponti. In particolare, il sistema di sorveglianza è definito “*risk – based*” poiché si declina in diverse attività da svolgere sulla base della Classe di Attenzione del ponte definita al livello 2. I principali strumenti operativi del sistema di sorveglianza sono le ispezioni, i monitoraggi strumentali e le prove di carico [3].

Nel capitolo §7.8 le Linee Guida propongono all'Ente gestore di inserire i dati provenienti dal sistema di sorveglianza nel database del sistema di gestione dei ponti (BMS). Il BMS è lo strumento a supporto delle decisioni dell'Ente manutentore per pianificare gli interventi da eseguire in funzione della priorità e dei costi della manutenzione [14].

Un elemento imprescindibile per il sistema di gestione dei ponti è il modello predittivo del degrado dell'opera. Quest'ultimo è realizzato implementando una struttura basata su modelli meccanici, deterministici oppure stocastici. Il modello più diffuso nei BMS è il processo markoviano. Un'ulteriore prospettiva in letteratura è data dall'impiego di modelli di regressione per determinare la curva di degrado nel tempo. Tuttavia, sia il processo markoviano che i modelli basati sulle regressioni presentano delle limitazioni se applicati nel peculiare contesto delle ispezioni visive e dei modelli di degrado.

Pertanto, nel presente elaborato di tesi si vuole descrivere un metodo alternativo per costruire le curve di degrado impiegate nei sistemi di gestione dei ponti utilizzando le tecniche di *Machine Learning*. In particolare, si presenterà l'applicazione dei modelli dinamici spazio di stato agli esiti delle ispezioni sintetiche per la previsione delle curve di degrado per superare alcune limitazioni dei metodi stocastici impiegati allo stato dell'arte attuale [6]. Nei prossimi capitoli si mostreranno, in primo luogo, le basi teoriche del metodo e, successivamente, i risultati dell'applicazione del modello ad un database sintetico.

4 Basi teoriche del *Machine Learning* per i modelli di degrado

4.1 Introduzione

I modelli stocastici più diffusi per la previsione del degrado delle opere si basano sul processo markoviano. Tuttavia, l'utilizzo delle catene di Markov per modellare il deterioramento delle strutture presenta delle limitazioni [7]. Anche l'uso di modelli basati sulle regressioni mostra degli svantaggi legati alle caratteristiche del dataset. Infatti, mediante questo metodo risulta difficile catturare la dipendenza temporale in serie temporali corte con un grado di previsione affidabile [38], [39].

Le tecniche di *machine learning* possono essere utilizzate per elaborare gli esiti delle ispezioni visive in modo da costruire le curve di previsione del degrado utilizzati nei sistemi di gestione dei ponti [43]. In particolare, i modelli spazio di stato si adattano bene alle serie temporali per la stima del deterioramento [44]. Infatti, queste tecniche, che si traducono in algoritmi implementabili in un codice di calcolo, sono utilizzate per eseguire una stima dello stato del sistema analizzato misure rumorose. Pertanto, saranno alla base dell'analisi proposta nel presente elaborato di tesi.

In questo capitolo verrà descritta la teoria alla base dei metodi di *Machine Learning* attraverso un'interpretazione bayesiana. Infine, sarà presentata la formulazione matematica dei modelli spazio di stato implementati nell'analisi dei dati sintetici delle ispezioni visive per costruire il modello di previsione del degrado.

4.2 Approccio bayesiano al *Machine Learning*

Il *machine learning* descrive un insieme di metodi che permettono di apprendere da un insieme di dati quale relazione sussiste tra le quantità di interesse di un sistema [43]. Lo scopo è di raccogliere informazioni su un sistema al fine di descriverne il funzionamento e predire il comportamento delle quantità non osservate. Di seguito si fornirà una definizione dell'apprendimento automatico mediante un approccio basato sulla definizione della probabilità bayesiana.

4.2.1 Definizione probabilistica del *Machine Learning*

Nel campo dell'ingegneria l'apprendimento del comportamento di un sistema da dati osservati non è una novità. Infatti, il compito dell'ingegnere è di estrapolare le relazioni tra le variabili di un set di dati in modo prendere una decisione. Al fine di ottenere una previsione del comportamento di un sistema tipicamente si costruiscono dei modelli *hard-coded* che vengono risolti dal tecnico con l'aiuto del computer. Il problema dell'*hard-coding* è l'introduzione nel codice sorgente di valori costanti che non possono essere cambiati senza la ricompilazione

dell'intero codice e, quindi, quando le variabili in gioco e le equazioni aumentano, aumenta anche la difficoltà nella risoluzione del problema [43].

La caratteristica principale del *machine learning* è spostare l'attività di apprendimento in un processo decisionale dall'operatore umano al computer [43]. Dunque, il compito del tecnico è di definire un modello generico che possa essere adattato ad un ampio range di problemi in modo da consentire al computer di apprendere e ricostruire le relazioni tra le variabili osservate prevedendone il comportamento senza l'intervento umano.

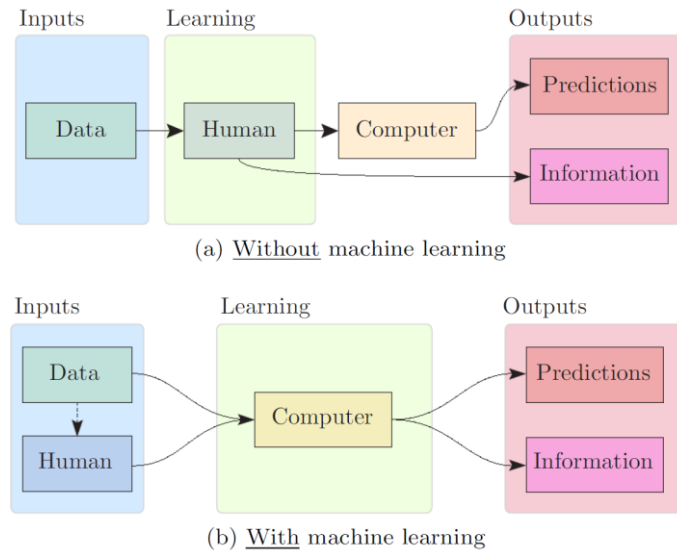


Figura 4.1: Paragone tra le tecniche di apprendimento del comportamento da un dataset con e senza l'utilizzo del ML [43].

Il termine apprendimento o *learning* fa riferimento ad un procedimento di deduzione delle caratteristiche di un sistema, a partire dalle osservazioni e dalle misure su un campione limitato di esso, per mezzo della stima dei parametri del modello utilizzato. In altri termini, per un modello generico

$$y = g(x; \theta) \quad (4.1)$$

x è l'input o variabile osservata, y è l'output valutato dal modello e θ è il parametro del modello che ne caratterizza il comportamento del modello [43]. y e θ sono ricavati sulla base delle osservazioni e delle misure. Le osservazioni raccolte sono implicitamente affette da errore e dunque l'obiettivo dell'apprendimento è intrinsecamente incerto. È quindi necessario adottare un approccio probabilistico.

Per questo motivo la probabilità rappresenta il nucleo centrale dei metodi di machine learning, in quanto è necessario modellare l'incertezza associata alla mancanza di conoscenza, in linea con la definizione di Laplace in merito alla teoria della probabilità ossia "*la théorie des probabilités n'est, au fond, que le bon sens réduit au calcul*" [43]. Ciò vuol dire che la probabilità descrive la mancanza di conoscenza rispetto a fenomeni intrinsecamente aleatori. Quindi, quanto meno

conosciamo in merito a un fenomeno quanto più è necessario utilizzare un approccio probabilistico.

4.2.2 La probabilità bayesiana e il *Machine Learning*

$\Pr(E_i)$ è la probabilità dell'evento E_i . Ci sono tre principali interpretazioni della probabilità: classica, frequentista e bayesiana. La definizione classica si basa sull'ipotesi che tutti i casi di un evento siano equiprobabili. Non sempre nella realtà si ricade in questa ipotesi. Pertanto, a differenza di quella classica, la definizione frequentista si basa sulla legge empirica del caso per la quale, dato un gran numero di prove fatte alle medesime condizioni, il numero di accadimenti dell'evento relativo al numero di campioni s tende al valore teorico della probabilità quando il numero di campioni $s \rightarrow \infty$:

$$\Pr(E_i) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{\#\{E_i\}}{s} \quad (4.2)$$

La definizione assume che la natura dell'incertezza è epistemica ossia che la probabilità dipende sul livello di conoscenza disponibile e cambia ogni qual volta si ottiene una nuova informazione [43]. La natura epistemica dell'incertezza è assunta dell'interpretazione bayesiana della probabilità e, dunque, si adatta perfettamente alle tecniche di apprendimento automatico. Infatti, nella definizione non è utilizzato il concetto di frequenza ma la probabilità viene interpretata come uno stato di conoscenza a partire dalle informazioni a disposizione. Dall'interpretazione bayesiana che si definisce la regola di Bayes.

Si definisce con probabilità condizionata $\Pr(E_1|E_2)$ la probabilità che si verifichi l'evento E_1 data la realizzazione dell'evento E_2 . La probabilità condizionata è definita come il rapporto tra la probabilità congiunta $\Pr(E_1E_2)$ e la probabilità marginale $\Pr(E_2)$, ossia la probabilità del singolo evento E_2 , con $\Pr(E_2) \neq 0$:

$$\Pr(E_1|E_2) = \frac{\Pr(E_1E_2)}{\Pr(E_2)} \quad (4.3)$$

La stessa equazione può essere riarrangiata per esprimere la probabilità congiunta come prodotto tra quella condizionata e quella marginale:

$$\Pr(E_1E_2) = \Pr(E_1|E_2) \cdot \Pr(E_2) = \Pr(E_2|E_1) \cdot \Pr(E_1) \quad (4.4)$$

In generale, chiamando con A l'insieme delle osservazioni e con E_i il generico i -esimo evento, si può esprimere la precedente formula come:

$$\Pr(AE_i) = \Pr(A|E_i) \cdot \Pr(E_i) = \Pr(E_i|A) \cdot \Pr(A) \quad (4.5)$$

Dal secondo e dal terzo membro della precedente relazione si ottiene la regola di Bayes:

$$\Pr(E_i|A) = \frac{\Pr(A|E_i) \cdot \Pr(E_i)}{\Pr(A)} \quad (4.6)$$

dove:

- $\Pr(E_i)$ è la *probabilità a priori* e coincide con la probabilità marginale di E_i . Il termine "a priori" significa che non tiene conto di nessuna informazione riguardo A .
- $\Pr(E_i|A)$ è la probabilità condizionata di E_i , noto A . Viene anche chiamata *probabilità a posteriori* essendo derivata o dipendente dallo specifico valore di A .
- $\Pr(A|E_i)$ è la probabilità condizionata di A , noto E_i .
- $\Pr(A)$ è la probabilità a priori di A , coincide con la probabilità marginale di A e funge da *costante di normalizzazione*.

Intuitivamente, la regola descrive il modo in cui le opinioni nell'osservare E_i siano arricchite dall'aver osservato l'evento A [43].

Si definisce un insieme di eventi mutuamente esclusivi e collettivamente esaustivi $\{E_1, E_2, E_3, \dots, E_n\} \in S$ cioè un insieme che gode delle seguenti proprietà $E_i E_j = \emptyset, \forall i \neq j$ e $\bigcup_{i=1}^n E_i = S$. Si considera l'insieme $A \in S$. Si illustrano gli insiemi attraverso il diagramma di Venn mostrato di seguito nella figura.

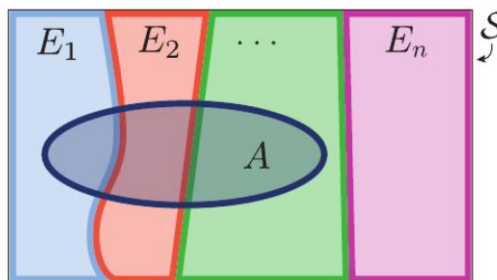


Figura 4.2: Diagramma di Venn [43]

La probabilità dell'evento A può essere ottenuta dalla somma di $\Pr(AE_i)$ ossia della probabilità congiunta di A e di ogni evento E_i :

$$\Pr(A) = \sum_{i=1}^n \Pr(AE_i) = \sum_{i=1}^n \Pr(A|E_i) \cdot \Pr(E_i) \quad (4.7)$$

Questa operazione permette di ottenere una probabilità marginale da una congiunta ed è chiamata marginalizzazione. Il termine di normalizzazione della regola di Bayes può essere riscritto e si ottiene:

$$\Pr(E_i|A) = \frac{\Pr(A|E_i) \cdot \Pr(E_i)}{\sum_{i=1}^n \Pr(A|E_i) \cdot \Pr(E_i)} \quad (4.8)$$

Nel caso in cui il dominio non è discreto ma continuo la probabilità è descritta in un intervallo infinitesimo Δx dalla funzione densità di probabilità (PDF). Data due variabili aleatorie $X \sim f(x)$ e $Y \sim f(y)$, la loro densità di probabilità congiunta è data dal prodotto della densità di probabilità condizionata e marginale. Pertanto, nei casi in cui y è nota e X non lo è, si può esprimere attraverso la regola di Bayes la *funzione di densità di probabilità a posteriori*:

$$f(x|y) = \frac{f(y|x) \cdot f(x)}{f(y)} \quad (4.9)$$

La distribuzione probabilistica più impiegata è la distribuzione normale o chiamata anche Gaussiana a seguito delle sue proprietà che la rendono adeguata alla maggior parte dei casi reali [43]. La funzione densità di probabilità (PDF) per una variabile aleatoria distribuita normalmente è definita nel campo dei numeri reali $x \in \mathbb{R}$ e si esprime come $X \sim \mathcal{N}(x; \mu, \sigma^2)$. I parametri della distribuzione sono la media μ e la varianza σ^2 . Quindi la PDF ha la seguente espressione analitica:

$$f_X(x) = \mathcal{N}(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.10)$$

La funzione densità di probabilità per n variabili aleatorie $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]^T$ è descritta da $x \in \mathbb{R}^n : \mathbf{X} \sim \mathcal{N}(x; \boldsymbol{\mu}_X, \boldsymbol{\Sigma}_X)$ dove $\boldsymbol{\mu}_X = [\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_n]^T$ è il vettore che contiene le medie e $\boldsymbol{\Sigma}_X$ è la matrice di covarianza che è data dal prodotto della matrice di correlazione e la matrice di covarianza [43]:

$$\boldsymbol{\Sigma}_X = \mathbf{D}_X \mathbf{R}_X \mathbf{D}_X = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ & & \ddots & \vdots \\ \text{sym.} & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

La funzione densità di probabilità di una distribuzione normale multivariata è descritta da:

$$f_X(x) = \mathcal{N}(x; \boldsymbol{\mu}_X, \boldsymbol{\Sigma}_X) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} (\det \boldsymbol{\Sigma}_X)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \boldsymbol{\mu}_X)^T \boldsymbol{\Sigma}_X^{-1} (x - \boldsymbol{\mu}_X)\right) \quad (4.11)$$

La distribuzione normale gode delle seguenti proprietà che verranno successivamente applicate nella definizione dei modelli spazio di stato:

- È completamente definita dal vettore delle medie $\boldsymbol{\mu}_X$ e dalla matrice di covarianza $\boldsymbol{\Sigma}_X$;
- Le distribuzioni marginali sono anch'esse normali e la funzione densità di probabilità è data da $x : X_i \sim \mathcal{N}(x; |\boldsymbol{\mu}_X|_i, |\boldsymbol{\Sigma}_X|_i)$;
- L'assenza di correlazione implica indipendenza statistica tra le variabili aleatorie (proprietà non sempre vera per altri tipi di distribuzione)

$$\rho_{ij} = 0 \Leftrightarrow X_i \perp X_j$$

- Il teorema del limite centrale afferma che la distribuzione asintotica ottenuta dalla somma di variabili aleatorie indipendenti e distribuite identicamente (anche con una distribuzione diversa da quella normale) è normale. Grazie a questa proprietà la distribuzione gaussiana è la più diffusa nei problemi reali;
- L'output di funzioni lineari di una variabile aleatoria normale è anch'esso normale. Data $x : \mathbf{X} \sim \mathcal{N}(x; \boldsymbol{\mu}_X, \boldsymbol{\Sigma}_X)$ e una funzione lineare $y = Ax + b$, le proprietà delle trasformazioni lineari permettono di ottenere la distribuzione $\mathbf{Y} \sim \mathcal{N}(y; A\boldsymbol{\mu}_X + b, A\boldsymbol{\Sigma}_X A^T)$;

Se si considera il caso di due variabili aleatorie $x : X \sim \mathcal{N}(x; \mu_X, \sigma_X^2)$ e $y : Y \sim \mathcal{N}(y; \mu_Y, \sigma_Y^2)$ e la funzione lineare $z = x + y$, la loro somma è descritta da $Z \sim \mathcal{N}(z; \mu_X + \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + 2\rho_{XY}\sigma_X\sigma_Y)$. Da notare che nel caso di indipendenza

statistica delle variabili aleatorie $X \perp Y$, la varianza della loro somma è la somma delle rispettive varianze. In generale la somma di un insieme di n variabili aleatorie normali correlate X_i tali che $X \sim \mathcal{N}(x; \boldsymbol{\mu}_X, \boldsymbol{\Sigma}_X)$ è pari a

$$Z = \sum_{i=1}^n X_i \sim \mathcal{N} \left(z; \sum_{i=1}^n |\boldsymbol{\mu}_X|_i, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\boldsymbol{\Sigma}_X|_{ij} \right) \quad (4.12)$$

Questa proprietà, in particolare, è utilizzata nel *machine learning* poiché riporta il problema nella trattazione analitica di funzioni lineari di variabili aleatorie normali.

- Le distribuzioni condizionali di variabili aleatorie distribuite normalmente sono normali.

4.3 Space-State Model (SSM): i modelli spazio di stato

I modelli spazio di stato, in inglese *Space – State Model* (SSM), sono adatti ad analizzare le serie temporali di dati. Come affermato nel capitolo precedente, i modelli delle serie possono essere costruiti anche attraverso i metodi di regressione. Le regressioni vengono spesso utilizzate per modellare le serie temporali di tipo stazionario, in cui la media e la varianza rimangono costanti nel tempo, oppure che presentano un trend, come mostrato in figura.

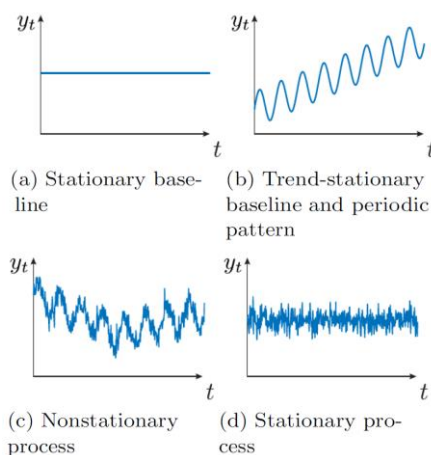


Figura 4.3: La stazionarietà delle serie temporali [43]

Al contrario delle regressioni, i modelli spazio di stato modellano le serie temporali secondo un modello dinamico [43]. Le regressioni si basano sull'apprendimento supervisionato, in inglese *supervised learning*, in modo da descrivere la dipendenza tra la risposta del sistema e le variabili indipendenti. D'altra parte, i modelli spazio di stato esprimono la dipendenza tra gli stati nascosti del sistema, chiamati in inglese *hidden states* ad istanti temporali consecutivi, ossia gli stati del sistema non direttamente osservati [43].

A titolo di esempio, per chiarire meglio il concetto si consideri il modo di un proiettile [43]: attraverso le equazioni cinematiche si può derivare un modello lineare della posizione del

proiettile all'istante $(t_0 + \Delta t)$ dalla posizione iniziale x_0 , con la velocità iniziale x'_0 e l'anoglo di inclinazione iniziale θ_0 .



Figura 4.4: Esempio del moto del proiettile [43]

Il sistema è analizzabile con i modelli spazio di stato più facilmente rispetto ai metodi di regressione. Infatti, dato il modello cinematico che descrive la dipendenza tra gli stati nascosti agli istanti temporali t e successivi $(t + \Delta t)$, l'obiettivo è stimare le variabili nascoste x_{t+1} quando sono noti gli x_t . Il modello cinematico è definito dal seguente sistema [43]:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + \dot{x}_t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{x}_t \Delta t^2 + w \\ \dot{x}_{t+1} = \dot{x}_t + \ddot{x}_t \cdot \Delta t + \dot{w} \\ \ddot{x}_{t+1} = \ddot{x}_t + \ddot{w} \end{cases} \quad (4.13)$$

dove $\mathbf{w} = [w \ \dot{w} \ \ddot{w}]^T$ è la perturbazione della traiettoria, definito come errore del processo. I modelli spazio di stato sono per tale motivo classificati come *unsupervised learning*, ossia apprendimento non supervisionato, perché permettono di costruire una densità di probabilità congiunta per una serie temporale di variabili nonostante la maggior parte di esse non possano essere tipicamente osservate [43].

Pertanto, in linea con l'obiettivo del presente elaborato di tesi, è possibile applicare i modelli spazio di stato dinamici nel campo dell'ingegneria civile per valutare lo stato di degrado delle infrastrutture nel tempo [43] come alternativa ai modelli più utilizzati in letteratura per valutare il deterioramento dei ponti che sono basati sulle catene di Markov oppure sulle regressioni [6].

La proposta dell'applicazione degli SSM per stimare il degrado delle opere è stata avanzata da J. Goulet e Z. Hamida in recenti pubblicazioni [7], [44], [45]. Nelle applicazioni proposte, la variabile di stato x descrive la condizione della struttura. A partire quindi dalla condizione iniziale x_0 , è possibile sviluppare un modello $f(x_1|x_0)$ in modo tale da rappresentare il processo cinematico di deterioramento: si ottiene una stima del degrado che sarà aggiornata ricorsivamente attraverso l'uso delle nuove osservazioni y_t non appena esse diventano disponibili.

Combinando l'informazione contenuta la conoscenza a priori, in inglese *prior knowledge*, $f(x_{t-1})$, il modello $f(x_t|x_{t-1})$ e l'osservazione y_t , è possibile ricavare una stima a posteriori, *posterior estimate*, $f(x_t|y_1, y_2, \dots, y_t)$ [43]. La procedura è ripetuta per tutti gli istanti temporali susseguenti quindi da $(t - 1)$ a t .

4.4 Linear Gaussian SSM (LG-SSM): i modelli spazio di stato lineari gaussiani

Nell'applicazione degli SSM al deterioramento dei ponti è utilizzata la famiglia dei modelli spazio di stato lineari gaussiani, che nella teoria dei controlli è meglio nota come Filtro di Kalman [46]. In particolare, è considerato il sistema lineare $\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}$, con $\mathbf{X} \sim \mathcal{N}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_X, \boldsymbol{\Sigma}_X)$, dove \mathbf{Y} rappresenta il vettore delle osservazioni e \mathbf{X} il vettore delle condizioni del sistema. Entrambi i vettori sono distribuiti normalmente.

Per le proprietà della distribuzione gaussiana, la variabile casuale restituita da una funzione lineare di una variabile distribuita normalmente è anch'essa distribuita in modo normale. Si possono, dunque, definire il vettore media $\boldsymbol{\mu}_Y$ e la matrice di varianza covarianza $\boldsymbol{\Sigma}_Y$ come [43]:

$$\boldsymbol{\mu}_Y = \mathbf{A}\boldsymbol{\mu}_X + \mathbf{b}, \boldsymbol{\Sigma}_Y = \mathbf{A}\boldsymbol{\Sigma}_X\mathbf{A}^T, \boldsymbol{\Sigma}_{XY} = \boldsymbol{\Sigma}_X\mathbf{A}^T \quad (4.14)$$

In forma matriciale esplicita, i termini sono così definiti:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_X \\ \boldsymbol{\mu}_Y \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_X & \boldsymbol{\Sigma}_{XY} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{XY} & \boldsymbol{\Sigma}_Y \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

La funzione densità di probabilità condizionata di \mathbf{X} , in inglese *probability density function* (PDF), data l'osservazione y , può essere espressa attraverso la regola di Bayes. Infatti, dividendo la funzione densità di probabilità congiunta di \mathbf{X} e \mathbf{Y} per la funzione di densità di probabilità di \mathbf{Y} valutata per l'osservazione \mathbf{y} si ottiene [43]:

$$f_{X|Y}(x|Y=y) = \frac{f_{XY}(x,y)}{f_Y(y)} = \mathcal{N}(x; \boldsymbol{\mu}_{X|y}, \boldsymbol{\Sigma}_{X|y}) \quad (4.16)$$

dove il vettore della media condizionata e la matrice covarianza condizionata sono dati da:

$$\boldsymbol{\mu}_{X|y} = \boldsymbol{\mu}_X + \boldsymbol{\Sigma}_{XY} \boldsymbol{\Sigma}_Y^{-1}(\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}_Y), \quad \boldsymbol{\Sigma}_{X|y} = \boldsymbol{\Sigma}_X - \boldsymbol{\Sigma}_{XY} \boldsymbol{\Sigma}_Y^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_{XY}^T \quad (4.17)$$

4.4.1 Configurazione di base e notazioni

Per chiarire meglio il concetto, si presenta la configurazione di base del problema considerando una sola variabile in modo tale da definire le notazioni utilizzate in seguito nella formulazione generale.

Si considerano [43]:

- il parametro $t \in \{0, 1, \dots, T\}$ per indicare gli istanti di tempo;
- la variabile di stato x_t al generico istante di tempo t , chiamata anche variabile nascosta o *hidden – state* perché non direttamente osservata;
- y_t come l'osservazione imperfetta.

La relazione che si determina tra y_t e x_t prende il nome di modello di osservazione [43]:

$$y_t = x_t + v_t, \quad \text{con } v_t: V \sim N(v; 0, \sigma_V^2) \quad (4.18)$$

Infatti, l'osservazione y_t è pari al valore della variabile di stato contaminata da un errore v_t , distribuito come una distribuzione gaussiana di media nulla e varianza σ_V^2 .

Al contrario, la variabile nascosta x_t si riferisce ad una condizione non direttamente osservabile e, quindi, è necessario un altro modello che ci possa consentire la transizione tra due stati successivi nel tempo. Si definisce il modello di transizione o modello dinamico, in inglese *dynamic model*, come [43]:

$$x_t = x_{t-1} + w_t, \quad \text{con } w_t: W \sim N(w; 0, \sigma_W^2) \quad (4.19)$$

In questo caso, l'errore è indicato come w_t e, analogamente al modello di osservazione, anch'esso risulta distribuito secondo una gaussiana di media nulla e varianza σ_W^2 . La varianza, in questo caso, a differenza delle osservazioni, rappresenta l'inesattezza dovuta alla differenza tra la realtà e il modello [43].

Come si può notare, l'equazione del modello di transizione è markoviana, poiché la variabile x_t dipende soltanto da x_{t-1} , ovvero, dall'istante di tempo antecedente rimanendo quindi indipendente da tutti gli altri precedenti [43].

In seguito, saranno utilizzate le seguenti abbreviazioni:

- $\{y_1, y_2, \dots, y_t\}$ è l'insieme delle osservazioni dal primo istante di tempo a t e viene abbreviato come $y_{1:t}$;
- $\mathbb{E}[X_t | y_{1:t}]$ è il valore atteso a posteriori date le osservazioni ed è indicato con $\mu_{t|t}$;
- $\text{var}[X_t | y_{1:t}]$ è la varianza a posteriori condizionata ed è espressa con $\sigma_{t|t}^2$.

Al tempo $t = 0$, è nota solo la conoscenza a priori rappresentata dalla media $\mathbb{E}[X_t | y_{1:t}] = \mu_0$ e dalla varianza $\text{var}[X_t | y_{1:t}] = \sigma_0^2$. Attraverso il modello di transizione e di osservazione si può definire la probabilità congiunta al tempo $t = 1$ per le variabili X_1 e Y_1 [43]:

$$f(x_1, y_1) = N([x_1, y_1]^T, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (4.20)$$

dove il vettore della media e la matrice di covarianza sono descritti da

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{E}[X_1] \\ \mathbb{E}[Y_1] \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \Sigma_X & \Sigma_{XY} \\ \Sigma_{YX} & \Sigma_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{var}[X_1] & \text{cov}[X_1, Y_1] \\ \text{cov}[Y_1, X_1] & \text{var}[Y_1] \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Questa fase è chiamata fase di predizione o *prediction step*. I valori di $\mathbb{E}[X_1]$ e $\text{var}[X_1]$ sono ottenuti propagando l'incertezza associata con la conoscenza a priori dello stato X_0 mediante il modello di transizione ($x_t = x_{t-1} + w_t$) e applicando le proprietà delle variabili aleatorie gaussiane esposte nel paragrafo precedente:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_1] &\equiv \mu_1 = \mu_0 \\ \text{var}[X_1] &\equiv \sigma_1^2 = \sigma_0^2 + \sigma_W^2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

I valori di $\mathbb{E}[Y_1]$ e $var[Y_1]$ sono ottenuti propagando l'incertezza associata con la conoscenza a priori dello stato X_1 mediante il modello di transizione ($y_t = x_t + v_t$) [43]:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[Y_1] &\equiv \mu_1 = \mu_0 \\ var[Y_1] &\equiv \sigma_0^2 + \sigma_W^2 + \sigma_V^2\end{aligned}\quad (4.24)$$

La covarianza è pari a:

$$cov[X_1, Y_1] = \sigma_0^2 + \sigma_W^2 = \sigma_1^2 \quad (4.25)$$

Nota la probabilità congiunta di X_1 e Y_1 , si procede con la fase di aggiornamento, chiamata anche *update step*. In questa fase si applica il teorema di Bayes per calcolare la probabilità a posteriori di x_1 data l'osservazione y_1 , ossia aggiornare la stima di x_1 ottenuta a partire dalla conoscenza di x_0 con la nuova osservazione. In particolare, si ottiene il rapporto tra la probabilità congiunta e la probabilità marginale applicando, come sopra, le proprietà della variabile casuale gaussiana [43]:

$$f(x_1|y_1) = \frac{f(x_1, y_1)}{f(y_1)} = N(x_1; \mu_{1|1}, \sigma_{1|1}^2) \quad (4.26)$$

dove:

$$\begin{aligned}\mu_{1|1} &= \mu_X + \Sigma_{XY}\Sigma_Y^{-1}(y_1 - \mu_Y) \\ \sigma_{1|1}^2 &= \Sigma_X - \Sigma_{XY}\Sigma_Y^{-1}\Sigma_{XY}^T\end{aligned}\quad (4.27)$$

Le fasi di predizione e aggiornamento possono essere estese alla generica transizione $t - 1 \rightarrow t$. Infatti, la fase di predizione è riscritta come segue:

$$f(x_t, y_t | y_{1:t-1}) = N([x_t, y_t]^T, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (4.28)$$

dove

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{E}[X_t | y_{1:t-1}] \\ \mathbb{E}[Y_t | y_{1:t-1}] \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \Sigma_X & \Sigma_{XY} \\ \Sigma_{YX} & \Sigma_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} var[X_t | y_{1:t-1}] & cov[X_t, Y_t | y_{1:t-1}] \\ cov[Y_t, X_t | y_{1:t-1}] & var[Y_t | y_{1:t-1}] \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

La conoscenza a posteriori nella fase di aggiornamento è così espressa [43]:

$$f(x_t | y_{1:t-1}) = \frac{f(x_t, y_t | y_{1:t-1})}{f(y_t | y_{1:t-1})} = N(x_t; \mu_{t|t}, \sigma_{t|t}^2) \quad (4.31)$$

dove:

$$\begin{aligned}\mu_{t|t} &= \mu_X + \Sigma_{XY}\Sigma_Y^{-1}(y_t - \mu_Y) \\ \sigma_{t|t}^2 &= \Sigma_X - \Sigma_{XY}\Sigma_Y^{-1}\Sigma_{XY}^T\end{aligned}\quad (4.32)$$

Di seguito è riportata il significato grafica del calcolo della densità di probabilità a posteriori tramite la formula di Bayes per il caso riguardante una sola variabile di stato.

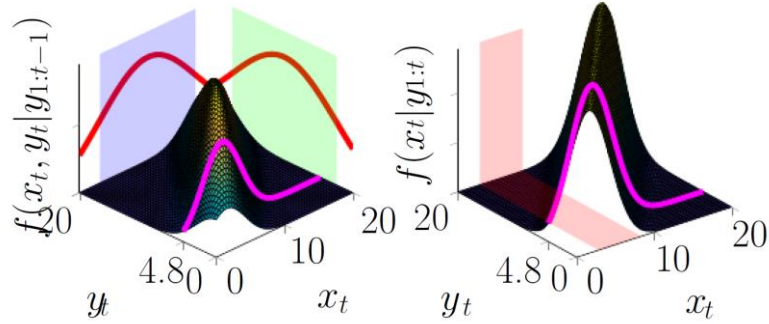


Figura 4.5 rappresentazione grafica del calcolo della densità di probabilità a posteriori [43]

La probabilità marginale $f(y_t|y_{1:t-1})$ descrive la densità di probabilità a priori di osservare y_t date tutte le osservazioni precedenti all'istante $t - 1$ ed è ricavata come [43]:

$$f(y_t|y_{1:t-1}) = N(y_t; \mu_{t|t-1}, \sigma_{t-1|t-1}^2 \sigma_W^2 + \sigma_V^2) \quad (4.33)$$

$f(y_t|y_{1:t-1})$ è chiamata anche verosimiglianza marginale, in inglese *marginal likelihood*, e si può esprimere in funzione dei parametri θ del modello:

$$f(y_t|y_{1:t-1}) \equiv f(y_t|y_{1:t-1}, \theta) \quad (4.34)$$

La funzione di verosimiglianza marginale è la componente chiave per stimare la densità di probabilità a posteriori dei parametri del modello nella stima di quest'ultimi [43]:

$$f(\theta|\mathcal{D}) = \frac{f(\mathcal{D}|\theta)f(\theta)}{f(\mathcal{D})} \quad (4.35)$$

dato che $f(\mathcal{D}|\theta) \equiv f(y_{1:T}|\mathcal{D}) = \prod_{t=1}^T f(y_t|y_{1:t-1}, \theta)$. Un approfondimento sui metodi di stima dei parametri sarà svolto successivamente.

4.4.2 Formulazione generale del LG – SSM

La formulazione vista fino ad ora relativa ad una singola variabile di stato è estesa al caso di variabili aleatorie multivariate [43]. Si considera il caso bidimensionale:

$$\mathbf{x}_t = [x_t \ x'_t] \quad (4.36)$$

x_t e x'_t ovvero, rispettivamente, il valore dalla condizione del sistema e la velocità di cambiamento dello stato. In questo caso, il modello di osservazione si esprime come [44]:

$$y_t = x_t + v_t \equiv \mathbf{C} \mathbf{x}_t + v_t \quad (4.37)$$

dove la matrice di osservazione \mathbf{C} è $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]$. Ciò vuol dire che un'osservazione y_t è funzione di x_t ma non della velocità x'_t . L'errore di osservazione v_t è sempre definito come in precedenza $v_t: V \sim N(v; 0, \sigma_V^2)$. Tuttavia, occorre specificare che, in questo caso, gli errori legati all'osservazioni sono descritti da una variabile nascosta multipla che viene indicata con $V \sim N(v; 0, \mathbf{R})$ dove \mathbf{R} è la matrice di covarianza degli errori delle osservazioni [43], [44].

Il modello di transizione, invece, per due variabili nascoste risulta essere dal seguente sistema di equazioni [43]:

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + \Delta t \cdot x'_{t-1} + w_t \\ x'_t = x'_{t-1} + w_t \end{cases} \quad (4.38)$$

da cui [44]

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A} \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{w}_t \quad (4.39)$$

dove la matrice di transizione \mathbf{A} descrive il modello cinematico mentre \mathbf{w}_t rappresenta la matrice degli errori dovuti al modello $\mathbf{W} \sim N(\mathbf{w}; 0, \mathbf{Q})$.

Come mostrato nel caso di una singola variabile di stato, nella fase di predizione si valuta la conoscenza a priori all'istante t a partire da quella a posteriori all'istante $t - 1$ [43]:

$$f(x_t, y_t | y_{1:t-1}) = N([x_t \ y_t]^T; \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (4.40)$$

dove la media e la covarianza sono definite come

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_X \\ \boldsymbol{\mu}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_{t|t-1} \\ \mathbb{E}[\mathbf{Y}_t | y_{1:t-1}] \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \Sigma_X & \Sigma_{XY} \\ \Sigma_{XY}^T & \Sigma_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{t|t-1} & \text{Cov}(X_t, Y_t | y_{1:t-1}) \\ \text{Cov}(X_t, Y_t | y_{1:t-1})^T & \text{Cov}(Y_t | y_{1:t-1}) \end{bmatrix}$$

I termini sono valutati a partire dallo stato al tempo $t - 1$, applicando i modelli di transizione e osservazione ed utilizzando le proprietà delle variabili casuali normali multivariate [43]:

$$\begin{aligned} \mu_{t|t-1} &= \mathbf{A} \mu_{t-1|t-1} \\ \Sigma_{t|t-1} &= \mathbf{A} \Sigma_{t-1|t-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \\ \mathbb{E}[\mathbf{Y}_t | y_{1:t-1}] &= \mathbf{C} \mu_{t|t-1} \\ \text{Cov}(\mathbf{Y}_t | y_{1:t-1}) &= \mathbf{C} \Sigma_{t|t-1} \mathbf{C}^T + \mathbf{R} \\ \text{Cov}(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t | y_{1:t-1}) &= \Sigma_{t|t-1} \mathbf{C}^T \end{aligned} \quad (4.42)$$

Segue la fase di aggiornamento, dove si ottiene la conoscenza a posteriori con la formula di Bayes [43]:

$$f(x_t | y_{1:t}) = \frac{f(x_t, y_t | y_{1:t-1})}{f(y_t | y_{1:t})} = N(x_t; \boldsymbol{\mu}_{t|t}, \boldsymbol{\Sigma}_{t|t}) \quad (4.43)$$

dove il vettore media a posteriori e la matrice covarianza a posteriori sono definiti come:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\mu}_{t|t} = \boldsymbol{\mu}_X + \Sigma_{XY} \Sigma_Y^{-1} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}_Y) \\ \boldsymbol{\Sigma}_{t|t} = \Sigma_X - \Sigma_{XY} \Sigma_Y^{-1} \Sigma_{XY}^T \end{cases} \quad (4.44)$$

La conoscenza a posteriori $f(x_t | y_{1:t})$ combina l'informazione derivante da quella a priori $\{\boldsymbol{\mu}_0, \Sigma_0\}$, la sequenza delle osservazioni $y_{1:t}$ ed il sistema di equazioni cinematiche descritte dal modello di transizione [43].

In sintesi:

- *Prediction Step*

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\mu}_{t|t-1} &= \mathbf{A}\boldsymbol{\mu}_{t-1|t-1} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{t|t-1} &= \mathbf{A}\boldsymbol{\Sigma}_{t-1|t-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}\end{aligned}\quad (4.45)$$

- *Update Step*

$$\begin{aligned}f(x_t|y_{1:t}) &= N(x_t; \boldsymbol{\mu}_{t|t}, \boldsymbol{\Sigma}_{t|t}) \\ \boldsymbol{\mu}_{t|t} &= \boldsymbol{\mu}_{t-1} + \mathbf{K}_t \mathbf{r}_t \\ \boldsymbol{\Sigma}_{t|t} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{C}) \boldsymbol{\Sigma}_{t|t-1} \\ \mathbf{r}_t &= \mathbf{y}_t - \tilde{\mathbf{y}}_t \\ \tilde{\mathbf{y}}_t &= \mathbf{C} \boldsymbol{\mu}_{t-1} \\ \mathbf{K}_t &= \boldsymbol{\Sigma}_{t|t-1} \mathbf{C}^T \mathbf{G}_t^{-1} \\ \mathbf{G}_t &= \mathbf{C} \boldsymbol{\Sigma}_{t|t-1} \mathbf{C}^T + \mathbf{R}\end{aligned}\quad (4.46)$$

La matrice \mathbf{K}_t è la matrice di guadagno di Kalman e la matrice \mathbf{G}_t è la matrice di innovazione della covarianza [46]. Il termine *Kalman Filter* fa proprio riferimento all'azione di pulizia e quindi rimozione del rumore connesso alle osservazioni di serie temporale [43]. Il filtraggio è un'azione intrinsecamente ricorsiva che si adegua alla perfezione per tutte quelle applicazioni in cui un flusso di dati deve essere continuamente processato mentre viene raccolto. Da notare, però, che nella formulazione classica di Kalman, vengono presi in considerazione anche dei termini addizionali che includono gli effetti di azioni esterne sul sistema [47]. Nelle applicazioni nel campo dell'ingegneria civile, questi termini saranno omessi [43].

In una notazione sintetica si può esprimere il filtro di Kalman nella forma contratta che evidenzia gli input e gli output [7], [44], [45]:

$$(\boldsymbol{\mu}_{t|t}, \boldsymbol{\Sigma}_{t|t}, \mathcal{L}_{t|t}) = \text{KalmanFilter}(\boldsymbol{\mu}_{t-1|t-1}, \boldsymbol{\Sigma}_{t-1|t-1}, \mathbf{y}_t; \mathbf{A}_t, \mathbf{C}_t, \mathbf{Q}_t, \mathbf{R}_t) \quad (4.47)$$

4.4.3 Stima dei parametri del modello

La definizione delle matrici $\{\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}\}$ coinvolte nei modelli di osservazione e transizione richiedono la stima di molti parametri $\boldsymbol{\theta}$ mediante l'utilizzo delle osservazioni $\mathcal{D} = \{y_{1:T}\}$. Un metodo oneroso dal punto di vista del calcolo è la stima della probabilità a posteriori dei parametri mediante l'approccio bayesiano [43]:

$$f(\boldsymbol{\theta}|\mathcal{D}) = \frac{f(\mathcal{D}|\boldsymbol{\theta})f(\boldsymbol{\theta})}{f(\mathcal{D})} \quad (4.48)$$

La componente chiave è la funzione verosimiglianza $f(\mathcal{D}|\boldsymbol{\theta})$. Con l'ipotesi di osservazioni indipendenti statisticamente, si può adottare la seguente formulazione:

$$f(\mathcal{D}|\boldsymbol{\theta}) = \prod_{t=1}^T f(y_t|y_{1:t-1}, \boldsymbol{\theta}) \quad (4.49)$$

dove la probabilità a priori di ogni osservazione $f(y_t|y_{1:t-1}, \boldsymbol{\theta})$ è data da una procedura di filtraggio. Tuttavia, essendo tale procedura onerosa dal punto di vista computazionale, nella pratica si utilizza il metodo della massima verosimiglianza (MLE) piuttosto che stimare l'intera probabilità a posteriori con l'approccio bayesiano [43]. Per la stima con il metodo della massima verosimiglianza, la serie di parametri ottimali è definita come

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg_{\boldsymbol{\theta}} \max \ln f(y_{1:T}|\boldsymbol{\theta}) \quad (4.50)$$

dove $\ln f(y_{1:T}|\boldsymbol{\theta})$ è il logaritmo della funzione di verosimiglianza [43]. È utilizzato il logaritmo poiché molto spesso la funzione verosimiglianza ha un valore molto piccolo e potrebbe essere sensibile a problemi di underflow aritmetico [43].

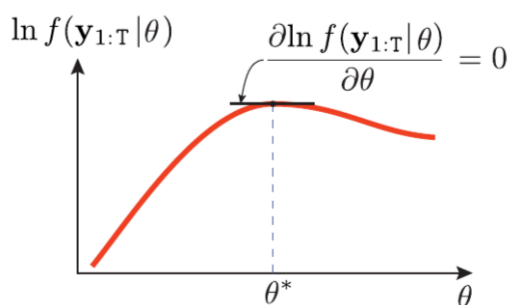


Figura 4.6: Annullamento della derivata della funzione verosimiglianza (algoritmi MLE) [43]

Dal punto di vista grafico, la serie di parametri ottimali corrisponde alla posizione dove la derivata del logaritmo della funzione verosimiglianza è pari a zero. I valori del vettore $\boldsymbol{\theta}^*$ possono essere ricavati mediante il metodo della discesa del gradiente come, ad esempio, l'algoritmo di Newton-Raphson [48].

4.4.4 L'algoritmo di ottimizzazione di Newton-Raphson

Il metodo di Newton-Raphson è un algoritmo per ricavare in modo approssimato gli zeri di una funzione reale [49]. Il massimo di una funzione corrisponde il punto in cui il suo gradiente è nullo, ovvero $f'(\theta) = 0$. Un modo per ricavare il massimo della funzione è linearizzare il gradiente usando con le derivate del secondo ordine di $f(\theta)$ e imponendole uguali a zero [43]. La formula analitica per questa formulazione linearizzata del gradiente approssimata nell'intorno di θ_{old} è [48]:

$$f'(\theta) = f''(\theta_{old}) \cdot (\theta - \theta_{old}) + f'(\theta_{old}) \quad (4.51)$$

Si può quindi stimare θ_{new} andando a impostare la precedente equazione uguale a zero e risolvendola in funzione di θ si ottiene [43], [48]:

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \frac{f'(\theta_{old})}{f''(\theta_{old})} \quad (4.52)$$

Un esempio è il massimo della funzione quadratica ($\propto x^2$), come riportato in figura.

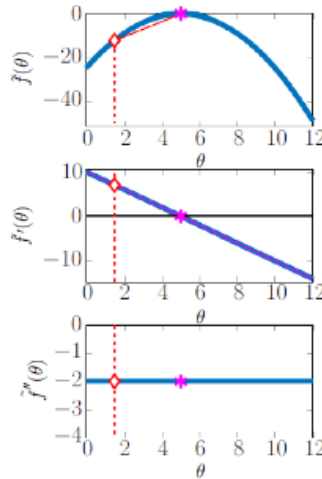


Figura 4.7: Esempio di Newton-Raphson applicato alla funzione quadratica [43]

L'equazione della funzione linearizzata esprime il gradiente di una funzione quadratica. Dunque, l'algoritmo converge ad una soluzione esatta in una sola iterazione, indipendentemente dal punto di partenza [48]. Ovviamente, per funzioni diverse la formulazione linearizzata del gradiente risulta un'approssimazione del punto di massimo.

Nella seguente figura è presentata un'applicazione in cui, per ogni ciclo dell'algoritmo, è riportata la funzione linearizzata del gradiente rappresentata dalla retta in rosa.

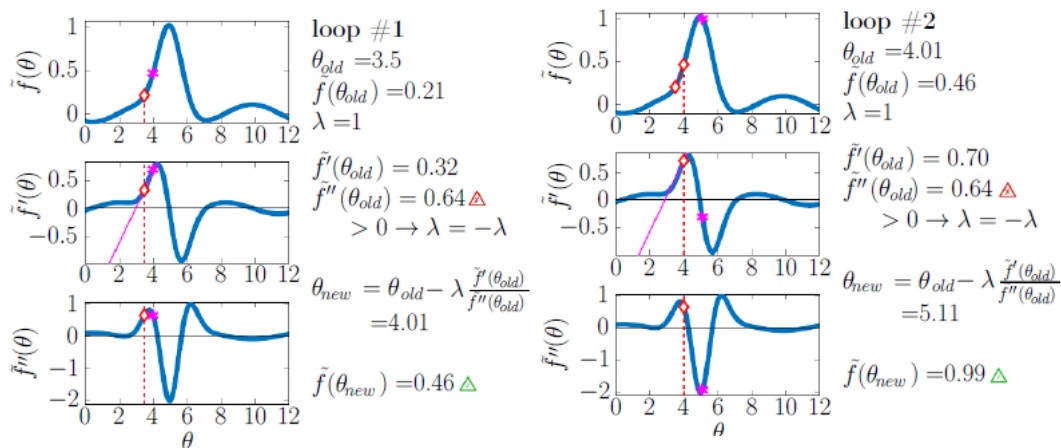


Figura 4.8: Risultati delle prime due iterazioni dell'algoritmo [43]

In generale, l'algoritmo di Newton-Raphson può essere impiegato per identificare i valori ottimali di $\theta^* = [\theta_1^* \theta_2^* \dots \theta_n^*]^T$ in domini con più dimensioni. La formulazione precedente è valida nel caso monodimensionale, e può essere estesa al caso pluridimensionale come segue [43]:

$$\theta_{new} = \theta_{old} - H[f(\theta_{old})]^{-1} \cdot \nabla f(\theta_{old}) \quad (4.53)$$

dove $H[f(\theta_{old})]$ denota la matrice Hessiana $n \times n$ contenente le derivate parziali del secondo ordine per la funzione $f(\theta)$ valutata in θ [43].

4.5 Forecasting e Smoothing (RTS-KF)

L'operazione di filtro mostrata finora aggiorna la densità di probabilità a posteriori della variabile nascosta x_t date tutte le osservazioni fino al tempo t [43]. Tuttavia, l'acquisizione di nuovi dati ad istanti successivi $t + 1$ non comporta alcun aggiornamento alla conoscenza della variabile di stato x_t all'istante t precedente.

Vi sono delle procedure per utilizzare i dati delle osservazioni degli istanti di tempo successivi a quello della variabile stimata [43]:

- attraverso la procedura di *smoothing* è possibile anche stimare la probabilità a posteriori della variabile x_t date le osservazioni fino al tempo $T > t$, ovvero, la $f(x_t | y_{1:T})$;
- una ulteriore possibilità, molto utile nelle applicazioni agli esiti delle ispezioni visive, è quella di prevedere lo stato del sistema x_{t+n} date le osservazioni fino al tempo t , con n pari al numero di istanti temporali futuri in cui si vuole effettuare la previsione. Quest'ultima procedura prende il nome di *forecasting*.

Le tre procedure di *filtering*, *smoothing* e *forecasting* sono esemplificate nell'immagine seguente:



Figura 4.9: Filtering, smoothing e forecasting [43]

In particolare, la procedura di *forecasting* stima la densità di probabilità $f(x_{t+n} | y_{1:t})$. Tale operazione si concretizza nella propagazione in modo ricorsivo della conoscenza attuale al tempo t ($\mu_{t|t}$, $\Sigma_{t|t}$) utilizzando la sola fase di predizione, senza aggiornare la stima dal momento che non sono disponibili le osservazioni future. Ad esempio, la stima da un istante t ad un istante $t + 1$ sarà governata dalla seguente formulazione:

$$\begin{aligned} f(x_{t+1} | y_{1:t}) &= N(x_{t+1}; \mu_{t+1|t}, \Sigma_{t+1|t}) \\ \mu_{t+1|t} &= \mathbf{A}\mu_{t|t} \\ \Sigma_{t+1|t} &= \mathbf{A}\Sigma_{t|t}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (4.54)$$

Nel caso in cui all'interno del sistema dei dati mancassero delle osservazioni, ossia in presenza di *missing data* a un determinato istante temporale t , viene applicata ricorsivamente soltanto la fase di predizione fino a quando dei nuovi dati non saranno ottenuti [43]. Quindi, i dati mancanti vengono trattati alla stessa stregua del forecasting utilizzando il modello di transizione. Questa caratteristica permette di poter applicare i modelli sazio di stato senza alcuna modifica anche a quelle serie temporali in cui alcuni dati risultano mancare [43].

La procedura di *smoothing*, invece, prevede la stima della densità di probabilità $f(x_t | y_{1:T})$. Si opera in senso opposto al canonico ossia si aggiorna la conoscenza della variabile all'istante di tempo t sulla base di quella dell'istante temporale successivo $t + 1$ [43]. Lo *smoothing* inizia all'ultimo istante di tempo stimato T , stimato precedentemente nell'operazione di filtering, e procede all'indietro ricorsivamente sino al raggiungimento dell'istante di tempo iniziale [43].

Il processo di *smoothing* segue il diagramma riportato in figura:

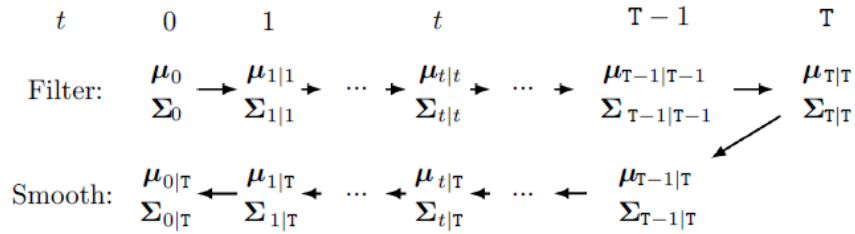


Figura 4.10: Il processo di smoothing [43]

Come si può notare, la conoscenza a posteriori dipende da [43]:

- la conoscenza a priori iniziale $(\mu_0 \Sigma_0)$;
- la sequenza di osservazioni $y_{1:T}$;
- il modello di transizione.

Di conseguenza, la procedura di *smoothing* è utilizzata per ricavare lo stato iniziale della variabile di stato $(\mu_0, \Sigma_0) \rightarrow (\mu_{0|T}, \Sigma_{0|T})$. Tipicamente, l'uso di questa operazione comporta un miglioramento nella qualità del modello [43]. L'algoritmo di *smoothing* è il *RTS Kalman smoother*, descritto dalla seguente formulazione [50]:

$$\begin{aligned}
 f(x_t | y_{1:T}) &= N(x_t; \mu_{t|T}, \Sigma_{t|T}) \\
 \mu_{t|T} &= \mu_{t|t} + J_t(\mu_{t+1|T} - \mu_{t+1|t}) \\
 \Sigma_{t|T} &= \Sigma_{t|t} + J_t(\Sigma_{t+1|T} - \Sigma_{t+1|t}) J_T^T \\
 J_T &= \Sigma_{t|t} A^T \Sigma_{t+1|t}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

L'*RTS Kalman Filter*, quindi, procede iterativamente a partire dall'istante $t = T - 1$ del normale Kalman Filter, dove il vettore media e la matrice covarianza, rispettivamente,

$$\begin{aligned}
 \mu_{t+1|T} &= \mu_{T|T} \\
 \Sigma_{t+1|T} &= \Sigma_{T|T}
 \end{aligned}$$

sono già noti sulla base dell'ultimo intervallo temporale [43].

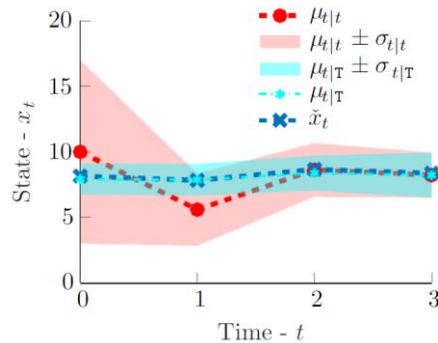


Figura 4.11: Paragone tra filtro di Kalman e RTS Kalman filter[43]

4.6 Switching Kalman Filter (SKF): modelli SSM in regime variabile

La teoria dei modelli stato – spazio è applicabile a sistemi che seguono lo stesso regime [43]. Nelle seguenti figure sono presenti due esempi in cui sono applicabili i modelli stato – spazio: il primo sistema è stazionario nel tempo, mentre il secondo presenta un trend ossia una variazione costante della velocità.

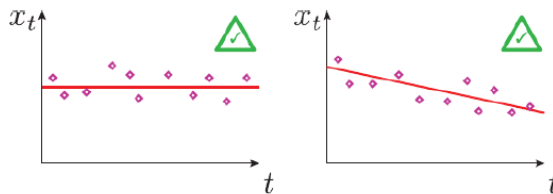


Figura 4.12: Sistemi ai quali è possibile applicare il modello stato – spazio [43]

Nella seguente figura è rappresentato un sistema nel quale non è possibile applicare un modello stato – spazio poiché c'è un cambio nel regime da velocità nulla a velocità costante.

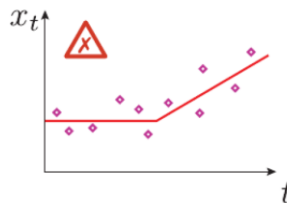


Figura 4.13: Sistema che presenta un cambiamento di regime al quale non è possibile applicare il modello stato di spazio [43]

La stima delle variabili nascoste insieme alla probabilità di cambiamento di ogni regime è onerosa dal punto di vista computazionale [43]. Per esempio, se si considera il caso in cui si hanno due possibili regimi, chiamati regime 1 e regime 2, si possono avere due possibili transizioni

insieme a due diversi modelli per descrivere ogni regime. Quindi per ogni percorso di transizione ci sono due possibili cambiamenti di regime, come mostrato nella seguente figura. $m1$ e $m2$ sono i due modelli, x sono le variabili di stato a ciascun istante.

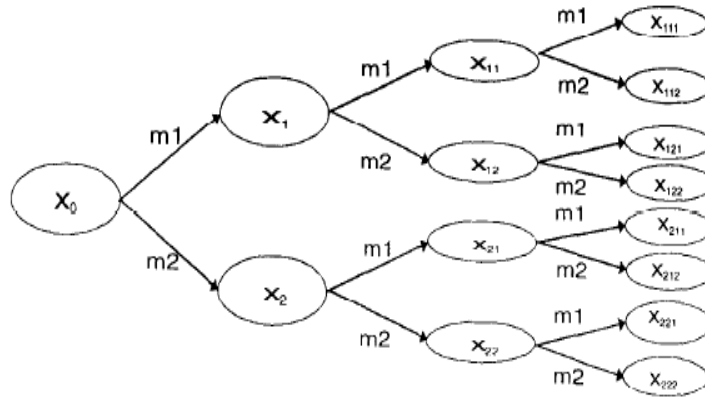


Figura 4.14: Possibili percorsi di transizione di regime in un sistema ad ogni istante di tempo [51]

In ogni istante di tempo il numero di percorsi da considerare cresce esponenzialmente: in generale, chiamato S il numero di regimi del sistema e T il numero di intervalli di campionamento, si possono avere un totale di S^T possibili percorsi.

Tuttavia, per alleggerire il carico computazionale è possibile adottare il metodo *Switching Kalman Filter* (SKF) che consiste nell'unire i possibili percorsi di transizione ad ogni intervallo di campionamento, come mostrato nella seguente figura [52].

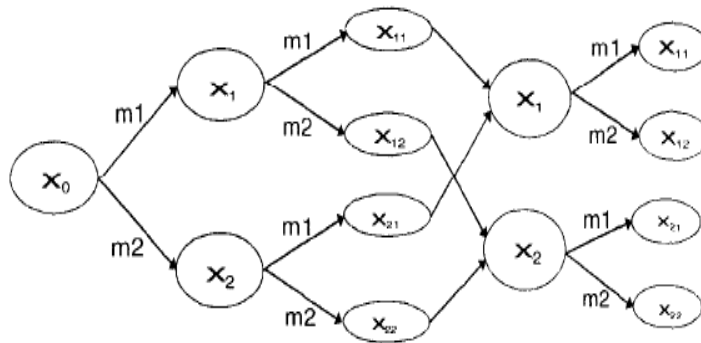


Figura 4.15: Sistema con cambiamento di regime e unione dei possibili percorsi di transizione ad ogni intervallo di tempo [51]

L'obiettivo è calcolare ad ogni istante di tempo t la probabilità di ogni regime insieme alle stime delle variabili nascoste corrispondenti a ciascuno di essi. Si riporta la notazione utilizzata nel seguito:

$$\mu_{t-1|t-1}^i = \mathbb{E}[X_{t-1} | y_{1:t-1}, s_{t-1} = i]$$

$$\Sigma_{t-1|t-1}^i = \text{cov}[X_{t-1}, X_{t-1} | y_{1:t-1}, s_{t-1} = i]$$

$$\pi_{t-1|t-1}^i = \Pr(S_{t-1} = i | y_{1:t-1})$$

L'apice i è riferito al regime i –esimo. $\pi_{t|t}^i$ è la notazione abbreviata per descrivere la probabilità del regime i al tempo t , date tutte le osservazioni disponibili fino all'istante t , $\Pr(S_t = i | y_{1:t})$.

Si considera il caso in cui il numero di regimi è pari a $i \in \{1,2\}$. L'algoritmo è basato su due step: filtraggio e unione. A partire dall'istante $t - 1$, si considera il modello 1. Ci sono due possibili percorsi ognuno dei quali corrisponde a un cambio di regime. I due possibili percorsi $j \in \{1,2\}$ sono esplorati nel primo step di filtraggio utilizzando il filtro di Kalman per ottenere le variabili di stato stimate a posteriori $\mu_{t|t}^{i,j}$ e $\Sigma_{t|t}^{i,t}$ insieme alla loro probabilità $\mathcal{L}_{t|t}^{i,j}$ [43]:

$$\left(\mu_{t|t}^{i,j}, \Sigma_{t|t}^{i,t}, \mathcal{L}_{t|t}^{i,j}\right) = \text{Filter}\left(\mu_{t-1|t-1}^i, \Sigma_{t-1|t-1}^i, y_t; \mathbf{A}_j, \mathbf{C}_j, \mathbf{Q}_j, \mathbf{R}_j\right) \quad (4.56)$$

In particolare, nel filtro gli stati iniziali sono ottenuti dal regime i e quindi $\mu_{t-1|t-1}^i, \Sigma_{t-1|t-1}^i$, le matrici $\{\mathbf{A}_j, \mathbf{C}_j, \mathbf{Q}_j, \mathbf{R}_j\}$ sono riferite al modello j e rappresentano la transizione del regime.

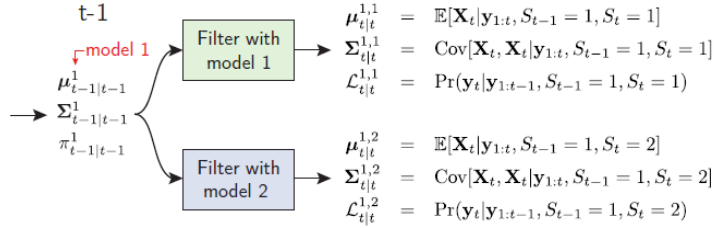


Figura 4.16: Dettaglio dello step di filtraggio del filtro SKF [43]

La procedura è ripetuta per ciascun modello, nella fattispecie per il modello 1 e 2, come mostrato nella seguente figura. Lo step successivo prevede l'unione delle variabili di stato stimate che sono state filtrate dallo stesso modello [43].

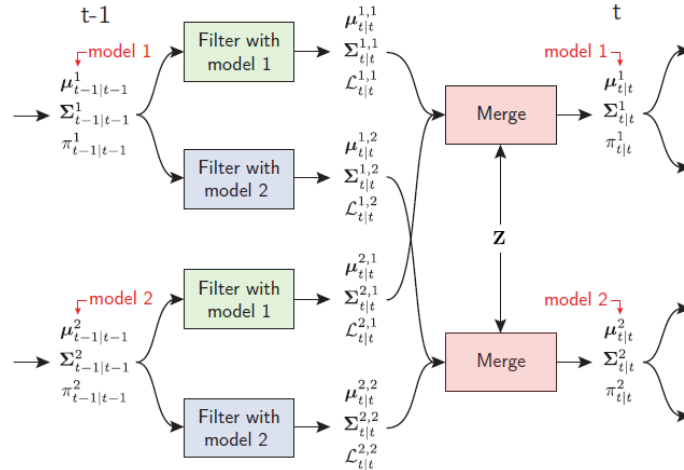


Figura 4.17: Dettaglio dello step di unione del filtro SKF [43]

In altre parole, come mostrato nella figura precedente, le stime delle variabili di stato del modello che partiva dal regime 1 all'istante $t - 1$ e viene filtrato dal regime 1 sono unite alle stime del modello che partiva dal regime 2 all'istante $t - 1$ e viene filtrato dal regime 1 [53]. Il secondo step, dunque, si basa sulla definizione di un modello mistura gaussiano ossia nell'unione di due variabili aleatorie gaussiane. La transizione da un regime all'altro è governata dalla matrice di transizione \mathbf{Z} che definisce la probabilità di transitare da uno stato all'istante $t - 1$ ad un altro all'istante $t + 1$ [53].

4.7 Componenti dei modelli lineari spazio di stato

Un aspetto chiave dei modelli lineari spazio di stato è rappresentare il comportamento del sistema attraverso la sovrapposizione degli effetti di ciascuna delle sue componenti [54]. Le componenti generiche sono: modello *local level*, modello *local trend*, modello *local acceleration*, modello periodico e modello autoregressivo [43]. Queste componenti possono essere assemblate per costruire modelli complessi di serie temporali. Ogni componente ha la sua specifica formulazione matematica e diverse matrici $\{\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}\}$.

Il modello *local level* descrive una quantità costante localmente nell'intervallo di tempo. È descritto da una singola variabile nascosta x^{LL} . A causa della sua natura costante, il coefficiente di transizione è pari a 1. La deviazione standard che descrive l'errore di predizione è pari a σ_w^{LL} . Il coefficiente nella matrice di osservazione è pari a 1. Le variabili nascoste e le matrici del modello di transizione e osservazione sono [43]:

$$\mathbf{x}^{LL} = x^{LL}, \mathbf{A}^{LL} = 1, \mathbf{C}^{LL} = 1, \mathbf{Q}^{LL} = (\sigma^{LL})^2 \quad (4.57)$$

Il modello *local trend* descrive una quantità che ha una variazione costante della velocità nell'intervallo di tempo considerato. È quindi definita dalle seguenti variabili nascoste e dalle seguenti matrici del modello di transizione e osservazione [43]:

$$\mathbf{x}^{LT} = \begin{bmatrix} x^L \\ x^{LT} \end{bmatrix}, \mathbf{A}^{LT} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}^{LT} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \mathbf{Q}^{LT} = (\sigma^{LT})^2 \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^4}{4} & \frac{\Delta t^3}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{2} & \Delta t^2 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Il modello *local acceleration* descrive una quantità che ha una variazione costante localmente dell'accelerazione nell'intervallo di tempo considerato. In questo caso, le variabili nascoste di stato sono tre. Il modello è descritto da [43]:

$$\mathbf{x}^{LA} = \begin{bmatrix} x^L \\ x^T \\ x^{LA} \end{bmatrix}, \mathbf{A}^{LA} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}^{LA} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \mathbf{Q}^{LA} = (\sigma^{LA})^2 \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^4}{4} & \frac{\Delta t^3}{2} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{2} & \Delta t^2 & \Delta t \\ \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

La componente periodica è espressa nella forma di Fourier ed è descritta da due variabili di stato nascoste $\mathbf{x}^S = [x^{S1} \ x^{S2}]^T$. La prima variabile nascosta contribuisce alle osservazioni, pertanto la matrice delle osservazioni sarà [43]:

$$\mathbf{C}^S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

Le altre matrici che descrivono il modello sono [43]:

$$\mathbf{A}^S = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega \\ -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}^{LT} = (\sigma^S)^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

con $\omega = \frac{2\pi \cdot \Delta t}{p}$ e p è il periodo della funzione. Questo modello è particolarmente efficace per i fenomeni che si ripetono periodicamente con un periodo noto p , come ad esempio le variazioni stagionali e giornaliere della temperatura.

Il modello autoregressivo è descritto da una singola variabile di stato nascosta x^{AR} che presenta una dipendenza da sé stessa nell'arco di intervalli di tempo consecutivi [43]. Si presenta il processo autoregressivo di ordine 1, dove lo stato corrente dipende solo da quelli precedenti [43]:

$$x_t^{AR} = \Phi^{AR} x_{t-1}^{AR} + w^{AR}, \quad w^{AR} \sim \mathcal{N}(w^{AR}; 0, (\sigma^{AR})^2)$$

Φ^{AR} è il coefficiente di autoregressione che è definito nella matrice di transizione \mathbf{A}^{AR} . Quindi le variabili di stato e le matrici del modello sono [43]:

$$\mathbf{x}^{AR} = x^{AR}, \mathbf{A}^{AR} = \Phi^{AR}, \mathbf{C}^{AR} = 1, \mathbf{Q}^{AR} = (\sigma^{AR})^2 \quad (4.60)$$

Il modello autoregressivo è impiegato per descrivere gli errori del modello che hanno una dipendenza intrinseca negli intervalli di tempo [43].

Ciascun modello può essere utilizzato come componente di un modello generale mediante l'operazione di assemblaggio delle componenti. Una serie temporale di osservazioni è modellata attraverso una prima fase di scelta delle componenti da utilizzare. Successivamente, si assemblano le componenti per formare le matrici globali $\{\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}\}$ [55]. Il vettore globale delle variabili di stato nascoste \mathbf{x} si ottiene concatenando in una colonna le variabili di stato definite da ogni componente scelta. La matrice di osservazione globale \mathbf{C} si ottiene concatenando in una riga i vettori \mathbf{C} di ciascuna componente scelta. La matrice di transizione \mathbf{A} e la matrice di covarianza \mathbf{Q} sono ottenute formando matrici diagonali a blocchi dove ciascun blocco contiene la matrice \mathbf{A} e \mathbf{Q} di ogni componente selezionata. Per ogni singola serie temporale la matrice degli errori di osservazione \mathbf{R} contiene solo un singolo termine, σ_v^2 .

I parametri incogniti di ogni componente descritti dal vettore $\boldsymbol{\theta}$ sono ricavati dai dati osservati utilizzando il metodo della massima verosomiglianza utilizzando l'algoritmo di Newton – Raphson [43]:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg_{\boldsymbol{\theta}} \max \sum_{t=1}^T \ln \mathcal{L}_t \quad (4.61)$$

4.8 Conclusioni

Le tecniche di *machine learning* sono uno strumento che si può adattare allo studio delle serie temporali delle ispezioni visive [43]. Infatti, la metodologia si basa sull'apprendimento di parametri del modello del fenomeno studiato a partire dall'insieme dei dati osservati. L'apprendimento del comportamento di un sistema dai dati osservati consiste nell'extrapolare le relazioni nell'insieme delle osservazioni a disposizione in modo prendere una decisione.

In particolare, nel capitolo sono stati presentati i fondamenti teorici dei modelli spazio di stato che saranno implementati per costruire i modelli di previsione del degrado. Nel prossimo capitolo sarà presentata l'applicazione del modello ad una serie temporale sintetica mediante un codice Matlab.

5 Applicazione del ML ai dati sintetici delle ispezioni visive

5.1 Introduzione

Lo scopo dell'elaborato di tesi è quello di analizzare la serie temporale delle difettosità relative D_R registrate durante le ispezioni visive per prevedere il deterioramento nel tempo del ponte e dei suoi elementi. Per raggiungere questo obiettivo sono stati generati e analizzati dei dati sintetici degli esiti delle ispezioni sui ponti esistenti. In questo capitolo si presenterà la metodologia applicata e la formulazione matematica sulla base della quale è stato sviluppato il modello.

Il modello fornisce una previsione della curva di degrado nel tempo che è possibile confrontare con quella sintetica per validare e verificare i risultati. Sulla base di tale previsione, saranno applicati i concetti presentati nel §7 delle nuove Linee guida in merito all'aggiornamento delle Classi di Attenzione e la definizione delle soglie d'allarme.

Tuttavia, attualmente non esiste un software stand-alone in grado di eseguire l'analisi degli esiti delle ispezioni visive mediante i modelli lineari dinamici spazio di stato [55]. Pertanto, per implementare il modello su Matlab è stato utilizzato il codice open-source OpenBDLM sviluppato da I. Gaudot, L. Ha Nguyen, S. Khazaeli, e J.-A. Goulet. OpenBDLM è un codice creato per il monitoraggio strutturale, ma risulta essere ben adattabile per l'analisi di serie temporali di diverse tipologie di dati [55].



Figura 5.1: Logo OpenBDLM [43]

In particolare, il codice OpenBDLM è una funzione di Matlab che può essere utilizzata in due modi diversi [56]:

- *interactive mode*: l'utente può interagire direttamente con il codice mediante la query della linea di comando di Matlab;
- *batch mode*: i dati di input sono forniti in un array.

La modalità scelta è la *batch mode*, in quanto è risultata facilmente implementabile all'interno di un codice globale che è in grado di:

- i. generare il dataset sintetico degli esiti delle ispezioni visive;
- ii. trattare i dati sintetici in modo da convertirli in un formato compatibile con OpenBDLM;
- iii. assegnare i parametri di input forniti dall'utente;

- iv. trattare i risultati di output di OpenBDLM;
- v. generare i grafici e le tabelle dei risultati.

Al termine del capitolo saranno discussi i risultati ottenuti e tratte le conclusioni.

5.2 OpenBDLM

Nell'analisi è stato utilizzato un codice open-source chiamato OpenBDLM per implementare il modello spazio di stato. Infatti, attualmente non esiste un software stand-alone che è in grado di applicare i modelli *SSM* [55]. Pertanto, per colmare questa mancanza, è stato sviluppato da I. Gaudot, L. Ha Nguyen, S. Khazaeli, e J.-A. Goulet un codice in Matlab che permette di applicare i modelli dinamici lineari bayesiani ai dati di una serie temporale. Inoltre, OpenBDLM permette di analizzare simultaneamente più serie temporali introducendo le informazioni derivanti dagli effetti ambientali osservati con la creazione di dipendenza tra le serie temporali.

Il codice si sviluppa attraverso quattro parti principali:

1. Pre-processamento dei dati
2. Costruzione del modello
3. *Learning* dei parametri del modello
4. Stima delle variabili di stato nascoste

Il digramma di flusso generale del codice è sintetizzato in figura.

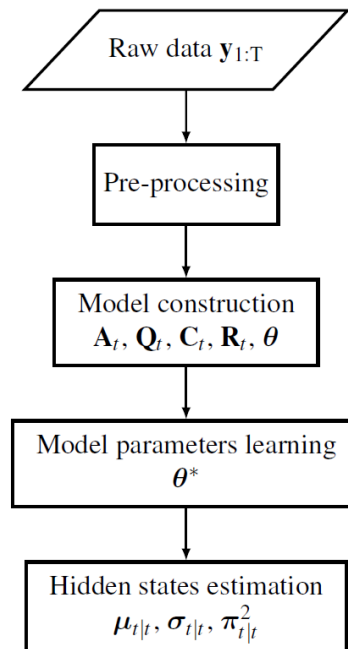


Figura 5.2: Diagramma di flusso generale OpenBDLM [55]

Il pre-processamento dei dati consiste nella sincronizzazione delle serie temporali. Infatti, nella maggior parte dei casi, l'insieme delle serie temporali disponibili è eterogeneo poiché i dati non sono acquisiti dallo stesso strumento di acquisizione.

I modelli dinamici non sono in grado di analizzare serie temporali asincrone. La sincronizzazione può essere realizzata in due modi: con la sostituzione del valore mancante corrispondente nella serie temporale con i dati mancanti, oppure con il *data-resampling* o ricampionamento definendo la media dei dati su una finestra temporale di lunghezza fissata. Di seguito in figura è riportato un esempio di ricampionamento del dataset per tre generiche serie temporali. Nel primo grafico sono riportate le serie temporali senza modifiche. Nel secondo grafico sono riportate le serie temporali ricampionate. In corrispondenza dei dati mancanti è inserito il dato mancante *NaN* che verrà successivamente stimato dal modello dinamico nella fase di predizione.

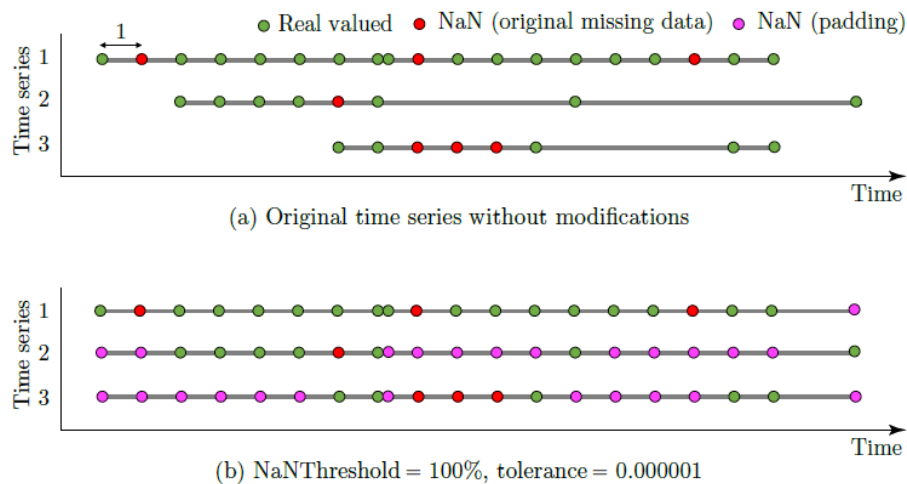


Figura 5.3: Esempio di resampling di tre serie temporali [56]

Nella fase di costruzione del modello, si definiscono quali sono i tipi di componenti del modello associati ad ogni serie temporale in modo tale da decomporre le serie temporali in un insieme di variabili di stato nascoste, ossia non direttamente misurate. Questa procedura, come già descritto in precedenza, permette di scomporre le serie temporali in *baseline* che sono slegate dai vincoli ambientali esterni. Ad ogni componente è associato un proprio modello e dei parametri racchiusi nelle matrici \mathbf{A} , \mathbf{C} , \mathbf{Q} , \mathbf{R} che verranno assemblate nel modello completo. Il codice supporta tre tipi di componenti, già analizzate nel capitolo precedente [56]:

- *Baseline* che è direttamente riferita alla risposta media di base della struttura; nel codice sono proposte tre componenti per descrivere la baseline a seconda delle varie situazioni: *local level*, *local trend* e *local acceleration*;
- Componente periodica che modella fenomeni periodici armonici; ad esempio, può essere riferita alla temperatura;
- Componente autoregressiva che modella l'errore del modello dipendente dal tempo.

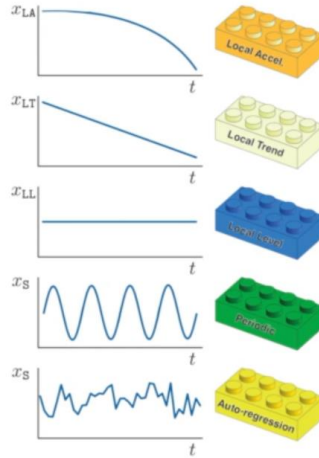


Figura 5.4: Componenti definite in fase di costruzione del modello [56]

La fase di *learning* prevede l'apprendimento dei parametri definiti nella precedente fase di costruzione del modello. I parametri sono stimati a partire dai dati con il principio della massima verosimiglianza. Per massimizzare la funzione verosimiglianza nel codice è implementato l'algoritmo di Newton-Raphson. Nel codice sono presenti valori di default per i parametri iniziali di partenza e per il numero di iterazioni massime.

θ name	θ^0	θ bounds
σ_w^{LL}	0	[NaN, NaN]
σ_w^{LT}	$10^{-7} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[NaN, NaN]
σ_w^{LA}	$10^{-8} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[NaN, NaN]
σ_w^{LcT}	$10^{-7} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[NaN, NaN]
σ_w^{LcA}	$10^{-7} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[NaN, NaN]
σ_w^{TcA}	$10^{-8} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[NaN, NaN]
σ_w^P	0	[NaN, NaN]
σ_w^{AR}	$10^{-1} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[0, Inf]
σ_w^{KR}	$10^{-1} \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[0, Inf]
$\sigma_w^{KR,1}$	0	[NaN, NaN]
σ_v	$0.05 \times \hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[0, Inf]
ϕ^{AR}	0.75	[0, 1]
p^P	[365.24, 1, 182.62]	[NaN, NaN]
p^{KR}	365.24	[NaN, NaN]
ℓ^{KR}	$2/L^{KR}$	[0, Inf]
ϕ^{L}	0.01	[-Inf, Inf]
μ_b^{LI}	0	[-Inf, Inf]
σ_b^{LI}	$\hat{\sigma}_{y_{obs}(1:T)}$	[0, Inf]

Figura 5.5: Tabella del manuale di riferimento di OpenBDLM con i parametri iniziali del modello [56]

Si riporta la tabella ripresa dal manuale di riferimento di OpenBDLM che riporta il valore di default dei parametri iniziali del modello. I valori dei parametri sono calcolati a partire dalla deviazione standard empirica ricavata utilizzando i dati osservati dal primo all'ultimo campione di indice T. È possibile modificare i valori di default in quanto ci si può scontrare con massimi locali: è necessario, infatti, settare propriamente i parametri iniziali di partenza in modo da trovare il valore reale dei parametri ossia il massimo della funzione log-verosimiglianza. Per controllare

la robustezza dei risultati è consigliato di ripetere più volte l’algoritmo con differenti valori iniziali di partenza dei parametri.

La stima delle variabili di stato nascoste, ossia di $\mu_{t|t}$ e $\sigma_{t|t}$, è calcolata attraverso l’utilizzo del filtro di Kalman in condizioni di regime variabile (*Switching Kalman Filter*). Lo *Switching Kalman Filter* permette di analizzare modelli dinamici multipli in parallelo, e di calcolare per ognuno la probabilità del modello $\pi_{t|t}$ ad ogni istante di tempo t . Attraverso questa procedura è possibile analizzare le anomalie definendo, ad esempio, due modelli paralleli, uno per il comportamento normale ed un altro per il comportamento anomalo. L’anomalia viene identificata quando la probabilità del comportamento anomalo è vicina a 1.

In sintesi, nella seguente figura è riportato il workflow dettagliato che descrive il funzionamento di OpenBDLM evidenziando le fasi in cui è necessario l’intervento dell’utente per la definizione delle impostazioni da adottare.

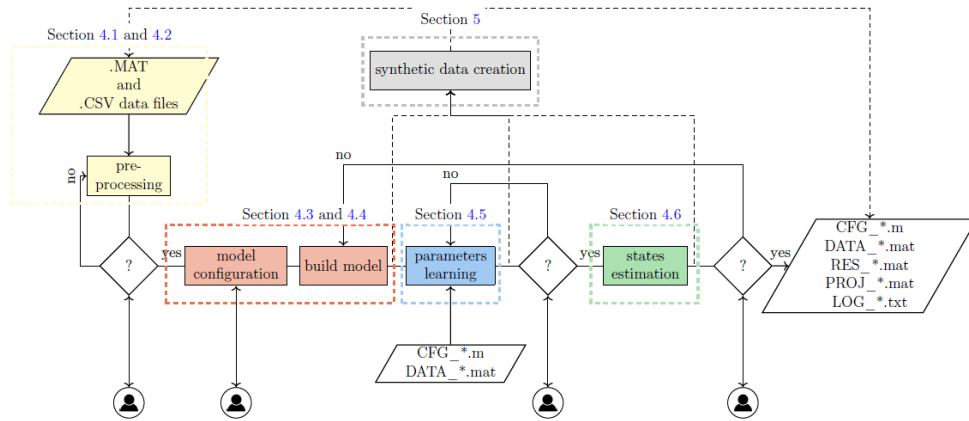


Figura 5.6: Workflow dettagliato sul funzionamento di OpenBDLM [56]

5.3 Metodica

5.3.1 Dati di input e parametri del modello

Si propone di modellare la curva di degrado con un modello spazio di stato. Il dataset è formato dagli esiti delle ispezioni sintetiche svolte nelle modalità prescritte dalle Linee Guida.

In particolare, si farà riferimento all’indice di difettosità relativa D_R ricavato dalle schede di difettosità dell’Allegato B delle Linee Guida che sono compilate in sede di ispezione visiva. L’indice è già stato precedentemente definito come:

$$D_R = \sum G \times K_1 \times K_2 \quad (5.1)$$

Si definisce la difettosità relativa massima $D_{R,MAX}$ come il valore massimo che può essere assunto dalla difettosità relativa, ossia in presenza di $K_1 = 1$ e $K_2 = 1$:

$$D_{R,MAX} = \sum G \times 1 \times 1 \quad (5.2)$$

La sommatoria è estesa ai difetti di un singolo elemento in modo da definire un indicatore per il degrado del singolo elemento.

Per ottenere un indicatore del degrado di più chiara lettura, si definisce l'indicatore percentuale di performance dell'elemento come:

$$IP(\%) = \left(1 - \frac{D_R}{D_{R,MAX}}\right) \cdot 100 \quad (5.3)$$

Quando si raggiunge la condizione di degrado massimo, ossia $D_R \equiv D_{R,MAX}$, l'indice di performance assumerà un valore pari allo 0%. Viceversa, in condizioni di degrado assente $IP = 100\%$.

All'interno del modello, lo stato di degrado del sistema esaminato è definito nel vettore \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Il vettore è composto da tre elementi:

- x è la condizione del sistema e coincide con l'indice di performance IP appena definito ossia il degrado dell'elemento;
- \dot{x} è la velocità di cambiamento dell'indice di performance IP nel tempo;
- \ddot{x} è l'accelerazione con cui evolve l'indice di performance IP nel tempo.

\dot{x} e \ddot{x} non sono direttamente osservati poiché in fase di ispezione visiva l'ispettore definisce il solo stato di condizione del sistema x in termini di D_R e, dunque, di IP .

Si assume che il comportamento del deterioramento sia descritto da un modello cinematico definito dal seguente sistema di equazioni [7], [57]:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ \dot{x}_{t-1} \\ \ddot{x}_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_t \\ \dot{w}_t \\ \ddot{w}_t \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

in forma compatta:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{w}_t \quad (5.6)$$

dove

- \mathbf{x}_t rappresenta il vettore di condizione all'istante t ;
- \mathbf{x}_{t-1} rappresenta il vettore di condizione all'istante $t - 1$;

- A è la matrice dei coefficienti del sistema cinematico; in altri termini, nell'ambito dei modelli spazio di stato, rappresenta la matrice di transizione, ossia la matrice che definisce la transizione tra due stati consecutivi del sistema;
- w_t è l'errore del modello.

L'errore del processo w_t si distribuisce come una variabile aleatoria normale multivariata di media nulla e matrice di varianza covarianza Q_t :

$$w_t : W \sim N(w; \mathbf{0}, Q_t) \quad (5.7)$$

La matrice di covarianza dell'errore del modello è definita come segue [6], [47]:

$$Q_t = \sigma_W^2 \times \begin{bmatrix} \frac{dt^5}{20} & \frac{dt^4}{8} & \frac{dt^3}{6} \\ \frac{dt^4}{8} & \frac{dt^3}{3} & \frac{dt^2}{2} \\ \frac{dt^3}{6} & \frac{dt^2}{2} & dt \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

I dati delle osservazioni sono utilizzati nella fase di aggiornamento utilizzando il modello di osservazione definito come segue [7], [57]:

$$y_t = Cx_t + v_t \quad (5.9)$$

dove

- y_t è l'osservazione, ossia il dato sintetico al tempo t in termini di performance IP ;
- C è la matrice di osservazione;
- v_t è l'errore di osservazione.

L'errore di osservazione v_t si distribuisce come la variabile aleatoria gaussiana V di media 0 e covarianza σ_V^2 :

$$v_t : V \sim N(v; 0, \sigma_V^2) \quad (5.10)$$

5.3.2 Generazione dei dati sintetici delle ispezioni visive

Non avendo a disposizione i dati delle osservazioni reali, è stato scelto di generare dei dati sintetici. La caratteristica principale del dataset sintetico è quella di rappresentare qualitativamente e quantitativamente gli esiti delle ispezioni reali.

In particolare, dal punto di vista quantitativo, il degrado dell'elemento è rappresentato dall'indice di performance che è definito nell'intervallo tra 0%, condizione di massimo degrado, e 100% condizione di degrado nullo. Dal punto di vista qualitativo, la performance della struttura peggiorerà nel tempo. Pertanto, la curva di degrado sintetica, in seguito chiamata anche curva di degrado reale, che è rappresentata dall'andamento sintetico dell'indice di performance, dovrà essere monotona decrescente.

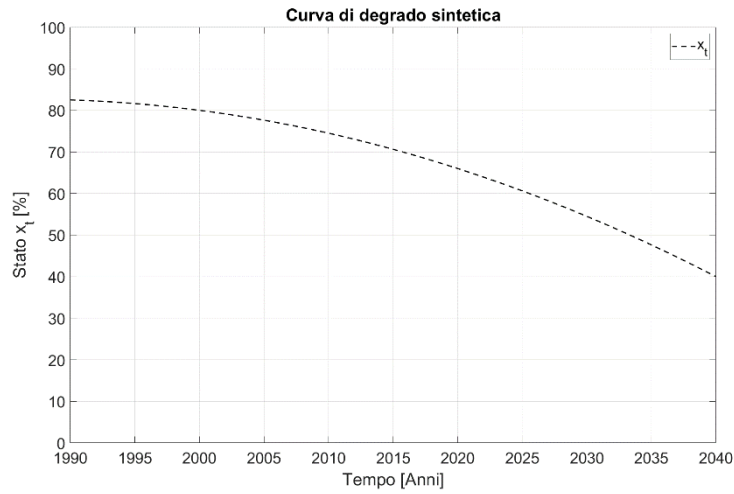


Figura 5.7: Esempio di curva di degrado sintetica

Definite le caratteristiche che meglio rispecchiano la realtà del fenomeno, la curva di degrado reale è generata utilizzando il modello di transizione $\mathbf{x}_t = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{w}_t$, precedentemente definito. L'errore del modello è assunto pari a $\sigma_W^2 = 5 \times 10^{-3}$ come indica in [7], [57].

Sulla curva di degrado reale sono stati campionate le osservazioni sintetiche. In analogia alle condizioni reali generate sinteticamente, anche gli esiti sintetici delle ispezioni devono avere caratteristiche tali da rispecchiare quelle reali.

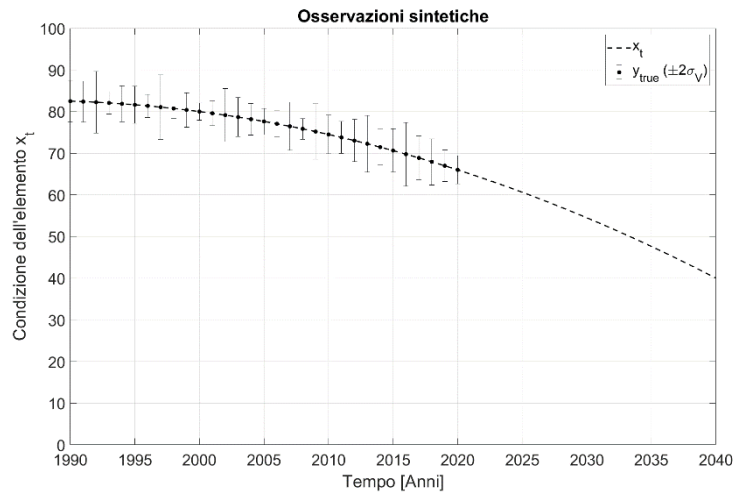


Figura 5.8: Definizione degli errori di osservazione σ_v

Nella realtà, infatti, ciascun ispettore esprime un giudizio diverso e ciascuno con il proprio errore. Pertanto, la deviazione standard dell'errore di osservazione σ_v non è definita costante ma si assume distribuita come una variabile aleatoria uniforme [7], [57]:

$$\sigma_V \sim U(\lambda_1, \lambda_2) \quad (5.11)$$

con i parametri della distribuzione pari a $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 6$. Le osservazioni sintetiche sono definite attraverso il modello di osservazione $y_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_{t-1} + v_t$ presentato precedentemente. Le osservazioni sintetiche sono campionate con una frequenza pari a quella delle ispezioni ordinarie e riportata nel §7 delle nuove Linee Guida 2020.

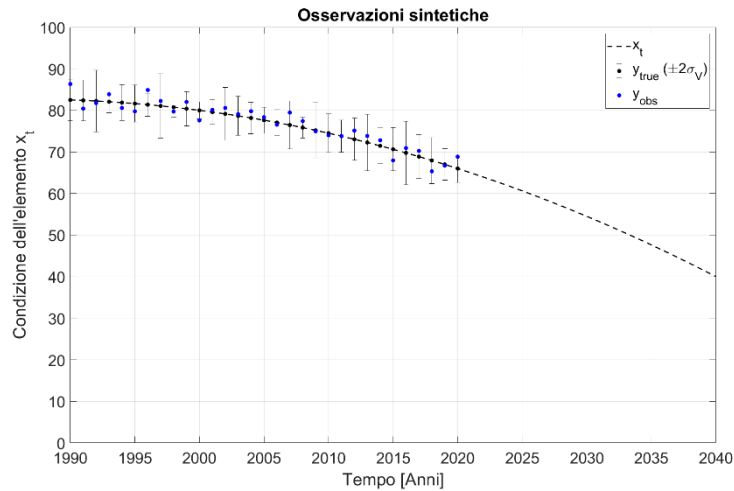


Figura 5.9: Osservazioni sintetiche

Gli esiti sintetici delle ispezioni costituiscono il dataset sulla base del quale verrà costruito il modello spazio di stato.

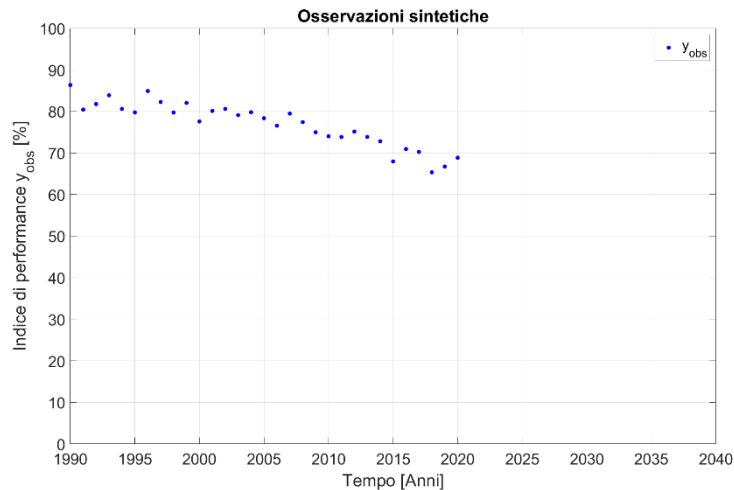


Figura 5.10: Esiti sintetici delle ispezioni che verranno processati dal modello

I dati sintetici generati sono salvati in un file .mat processabile con OpenBDLM. Il file .mat è composto da:

- Un vettore di tipo *cell* chiamato “labels” di dimensione 1×1 che contiene il nome della serie temporale, ossia ‘ISP’;
- Un vettore colonna di tipo *double* chiamato “timestamps” di dimensioni $N \times 1$ dove N è pari al numero di dati sintetici generati; il vettore contiene gli intervalli di tempo della serie;
- Un vettore colonna di tipo *double* chiamato “values” di dimensioni $N \times 1$ dove N è pari al numero di dati sintetici generati; il vettore contiene i dati sintetici generati.

Nel vettore “timestamps” sono inseriti gli intervalli temporali in cui effettuare le previsioni in corrispondenza dei quali sarà inserito il valore mancante ‘NaN’ nel vettore “values”. In questo modo, infatti, il modello applicherà in presenza dei valori mancanti le sole equazioni di transizione e non quelle di osservazione andando a calcolare la previsione del valore.

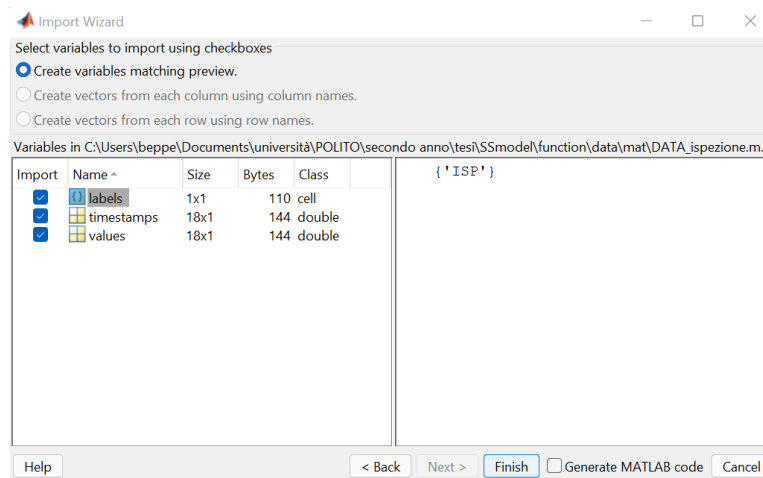


Figura 5.11: Costruzione del file .mat compatibile con OpenBDLM

5.3.3 Scelta dei parametri e processing dei dati

I dati sintetici sono modellati con il filtro di Kalman implementato nel codice di OpenBDLM:

$$(\mu_{t|t}, \Sigma_{t|t}, \mathcal{L}_{t|t}) = \text{KalmanFilter}(\mu_{t-1|t-1}, \Sigma_{t-1|t-1}, y_t; \mathbf{A}_t, \mathbf{C}_t, \mathbf{Q}_t, \mathbf{R}_t) \quad (5.12)$$

In particolare, si è scelto di costruire il modello con la componente *local acceleration* perché si presta a descrivere al meglio il sistema analizzato.

I parametri del modello sono definiti nel seguente vettore:

$$\boldsymbol{\theta} = [\sigma_W^{LA} \quad \sigma_V] \quad (5.13)$$

dove

- σ_W^{LA} è la deviazione standard del modello *local acceleration*;
- σ_V è la deviazione standard delle osservazioni.

La stima dei parametri è effettuata attraverso la stima della massima log-verosimiglianza (MLE):

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg_{\boldsymbol{\theta}} \max \ln f(y_{obs(1:T)}|\boldsymbol{\theta}) \quad (5.14)$$

dove

- $\boldsymbol{\theta}^*$ è il vettore dei parametri ottimizzato;
- $y_{obs(1:T)}$ è il vettore delle osservazioni sintetiche;
- $f(y_{obs(1:T)}|\boldsymbol{\theta})$ è la funzione verosimiglianza.

L'ottimizzazione è eseguita attraverso l'algoritmo di Newton – Raphson. I valori iniziali dei parametri $\boldsymbol{\theta}_0$ sono calcolati sulla base della deviazione standard $\sigma_{y_{obs(1:T)}}$ valutata utilizzando i dati osservati dal primo campione fino al campione di indice T , dove con T indica l'ultimo intervallo di tempo della serie temporale [56]. In particolare, il vettore dei parametri $\boldsymbol{\theta}$ è inizializzato con i seguenti valori [56]:

$$\begin{aligned} \sigma_W^{LA} &= 10^{-8} \cdot \sigma_{y_{obs(1:T)}} \\ \sigma_V &= 0.05 \cdot \sigma_{y_{obs(1:T)}} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Stimato il vettore dei parametri ottimizzati $\boldsymbol{\theta}^*$ si procede alla creazione del modello e al calcolo delle variabili di stato \boldsymbol{x} . Per inizializzare il processo sono definiti i valori iniziali di media $\boldsymbol{\mu}_0$ e covarianza $\boldsymbol{\Sigma}_0$ al tempo $t = 0$ [56]:

$$\boldsymbol{\mu}_0 = \mu_{y_{obs(1:T/10)}} \quad (5.16)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_0 = \begin{bmatrix} (2 \cdot \sigma_{y_{obs(1:T)}})^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_{obs(1:T)}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_{obs(1:T)}}^2 \end{bmatrix}$$

dove $\mu_{y_{obs(1:T/10)}}$ è la media corrispondente al 10% dei dati osservati.

La stima degli stati del sistema è eseguita utilizzando la modalità *Kalman smoother*: la fase di *smoothing* inizia all'ultimo istante di tempo $t = T$ stimato precedentemente nell'operazione di *filtering*, e procede all'indietro ricorsivamente sino al raggiungimento dell'istante di tempo iniziale $t = 0$. In questo modo si migliora la stima che si otterrebbe adottando il semplice filtro di Kalman. Nei gli intervalli temporali in cui è stato inserito il valore mancante 'NaN' nel vettore "values" il modello applicherà le sole equazioni di transizione e non quelle di osservazione in modo da valutare la previsione dello stato del sistema.

5.3.4 Dati di output

I risultati restituiti in output dal modello sono compilati in un file .csv con tre colonne:

- Nella prima colonna sono riportati i *timestamps*, ossia le marche temporali;
- Nella seconda colonna è inserita la media;
- Nella terza colonna è inserita la deviazione standard.

Nell'intestazione del file è inserito il nome della serie temporale e la prima marca temporale in formato 'anno – giorno – mese – ora – minuti – secondi'.

In particolare, sono generati quattro file .csv, uno per ogni variabile di stato definita precedentemente nel vettore \mathbf{x} , ossia *local level*, *local trend*, *local acceleration*, ed uno per la curva di degrado predetta.

5.3.5 Aggiornamento della CdA e costruzione della carta di controllo

In corrispondenza di ogni ispezione ordinaria o straordinaria viene eseguito un aggiornamento della Classe di Attenzione come disposto nel § 4 delle Linee Guida [3]. Noto l'andamento dell'*IP* nel tempo fornito in output dal modello, si ricava la previsione della Classe di Attenzione dell'elemento per intervalli di tempo futuri a quello delle ispezioni.

La corrispondenza tra gli intervalli di valore dell'indice di performance *IP* e le Classi di Attenzione è definita correlando in modo opportuno l'*IP* alla Difettosità relativa D_R : la classe bassa è stata fatta corrispondere ai valori dell'indice *IP* per cui $D_R < 5$ e la classe alta ai valori per cui $D_R > 25$ [3]. Il campo intermedio è suddiviso in intervalli eguali del valore dell'indice *IP*.

Dalla previsione della performance dell'elemento nel tempo, inoltre, si può costruire una carta di controllo degli esiti delle ispezioni visive, definendo le soglie di attenzione e di allarme in corrispondenza delle quali dovranno essere attivate le procedure più opportune, come descritto nel § 7.7.2 delle Linee guida [3].

I limiti sono definiti nel seguente modo:

- Il valore atteso corrisponde al valore predetto dal modello;
- La soglia di attenzione corrisponde all'intervallo di confidenza $[-\sigma; +\sigma]$;
- La soglia di allarme corrisponde all'intervallo di confidenza $[-2\sigma; +2\sigma]$.

5.3.6 La teoria dell'utilità attesa per la performance dell'opera

Ottenuta la previsione del degrado del singolo elemento si vuole estendere l'analisi all'intera opera. Lo scopo è quello di valutare la performance dell'opera nel tempo in modo da programmare gli interventi da eseguire. Per passare dal livello – elemento al livello – opera si propone di utilizzare l'approccio definito dalla teoria dell'utilità attesa [7].

La teoria dell'utilità attesa è stata sviluppata nell'ambito della teoria dei giochi, in *Theory of Games and Economic Behaviour*, da John von Neumann e Oskar Morgenstern nel 1944 [58]. Si basa sul calcolo dell'utilità attesa con la seguente formula [59]:

$$U(p) = \sum u(x_k)p_k \quad (5.17)$$

dove

- p_k è la probabilità di realizzazione del risultato x_k ;
- la funzione $u(x_k)$ esprime l'utilità assegnata a ciascun risultato.

L'utilità è l'attitudine reale o presunta di un bene economico a soddisfare un bisogno economico.

Nell'ambito dell'applicazione alle ispezioni visive, si adotta la metodica esposta dalla teoria considerando l'utilità attesa paragonabile alla performance complessiva dell'opera:

$$U(p) \equiv IP_{opera} \quad (5.18)$$

In particolare, definite le possibili realizzazioni nel vettore

$$\mathbf{x} = [CdA\ Bassa, CdA\ medio - bassa, CdA\ media, CdA\ medio - alta, CdA\ alta]^T$$

si calcola la percentuale del numero di elementi in ciascuna Classe di Attenzione:

- p_1 è la percentuale degli elementi in classe bassa;
- p_2 è la percentuale degli elementi in classe medio – bassa;
- p_3 è la percentuale degli elementi in classe media;
- p_4 è la percentuale degli elementi in classe medio – alta;
- p_5 è la percentuale degli elementi in classe alta;

Si propongono i valori dell'utilità u corrispondenti a ciascuna realizzazione pari a $u_1 = 1$, $u_2 = 0.75$, $u_3 = 0.5$, $u_4 = 0.25$ e $u_5 = 0$ in modo tale che, ad esempio, l'utilità attesa dell'opera, ossia la sua performance, sia

- $IP_{opera} = 100\%$ quando $p_1 = 100\%$ e $p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = 0\%$;
- $IP_{opera} = 0\%$ quando $p_5 = 100\%$ e $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0\%$.

5.4 Discussione dei risultati

In questo paragrafo sono discussi i risultati ottenuti presentando, in primo luogo, le potenzialità e i vantaggi delle tecniche di *Machine Learning* applicate alle ispezioni visive; successivamente, verranno mostrati i risultati dell'applicazione del modello agli esiti sintetici delle ispezioni sia al livello – elemento che al livello – opera.

5.4.1 Potenzialità e vantaggi del ML applicato alle ispezioni visive

Il vantaggio dell'applicazione dei modelli spazio di stato alle ispezioni visive consiste nella performance robusta nonostante dataset caratterizzati da una discreta rumorosità [44]. Inoltre, a differenza dei metodi basati sulle regressioni, gli SSM permettono di aggiornare *online* la stima predetta, vale a dire che ogni qualvolta è disponibile una nuova osservazione aumenta la conoscenza del sistema studiato [7]. Ciò permette di accurare la precisione della predizione del modello e, al contempo, diminuirne l'incertezza.

Per chiarire e validare queste caratteristiche, di seguito è proposta un'applicazione del modello spazio di stato ad un insieme di dati sintetici valutato su una serie temporale che parte nel 1985 e termina nel 2050.

Gli esiti sintetici delle ispezioni sono campionati con cadenza biennale, in accordo con la frequenza minima prescritta dal §7 delle nuove Linee Guida 2020, dal 1985 fino al 2011.

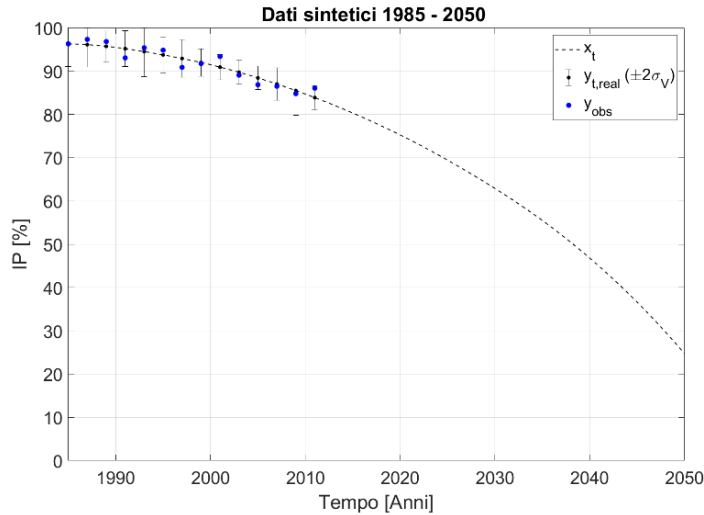


Figura 5.12: Serie temporale dal 1985 al 2050 con dati sintetici generati fino al 2011

Per valutare le potenzialità del modello, sono state aggiunte progressivamente quattro nuovi esiti sintetici di ispezioni eseguite nel 2013, 2015, 2017 e 2019. Gli esiti delle nuove osservazioni sono riportati con asterischi rossi nel seguente grafico.

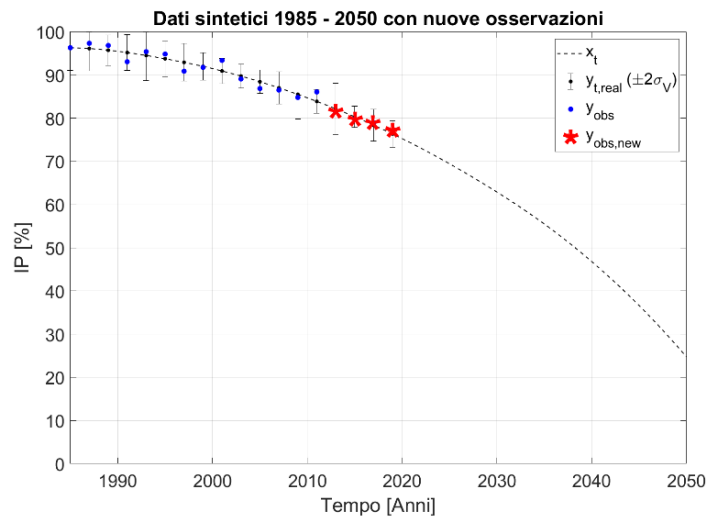


Figura 5.13: Aggiornamento del dataset con quattro nuove osservazioni dal 2013 al 2019

Di seguito vengono confrontati due grafici che riportano la curva predetta dal modello in rosso e la curva generata sinteticamente in nero.

Nel primo grafico è mostrata la stima ottenuta dal modello con l'aggiornamento di una sola nuova osservazione corrispondente all'anno 2013. Il secondo grafico, invece, riporta la stima ottenuta aggiornando il modello con le nuove osservazioni del 2015, 2017 e 2019.

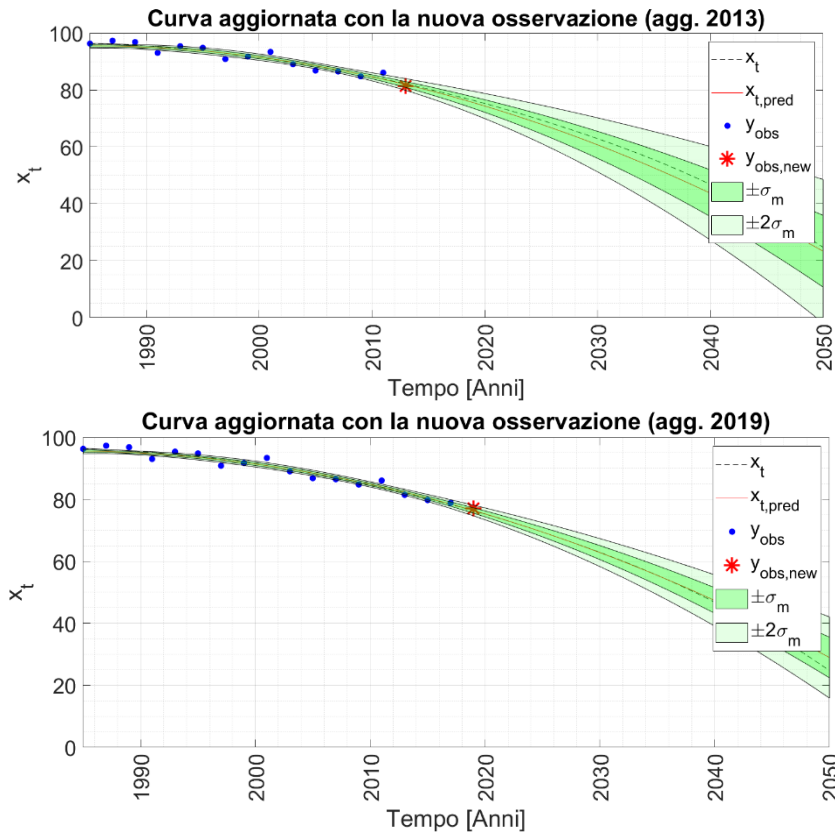


Figura 5.14: Confronto tra l'andamento dell'indice di performance predetto dal modello aggiornato con la nuova osservazione nel 2013 (sopra) e nel 2019 (sotto)

Si può notare come la capacità di predizione del modello con più osservazioni aggiornate sia superiore rispetto a quella con la sola nuova osservazione del 2013. Infatti, la curva rossa predetta tende quasi a sovrapporsi a quella tratteggiata in nero, che rappresenta il valore reale in quanto sintetico. Inoltre, l'intervallo di confidenza in verde si restringe nel grafico con più dati e, per questo, l'aggiunta di nuove informazioni produce un decremento di incertezza nel modello.

5.4.2 Stima della performance dell'elemento

Verranno presentati di seguito i risultati relativi alla stima della performance del ponte ottenuta dal modello applicato agli esiti delle ispezioni visive, dapprima al livello – elemento e, nel paragrafo successivo, al livello – opera.

L'applicazione del modello è stata eseguita su un campione di dati sintetici che rappresenta l'insieme degli esiti delle ispezioni visive di un elemento del ponte. Tuttavia, per ottenere un

dataset sintetico quanto più fedele alla realtà, i dati riferiti al primo anno di ispezioni sono stati forniti dagli esiti delle schede di difettosità riferite ad un ponte esistente realmente ispezionato. Il ponte è costituito dagli elementi in tabella:

Tipologia	N° elementi
Spalle	2
Pile	1
Giunti	3
Piedritti	1
Archi	4
Travi longitudinali	4
Traversi inferiori	12
Travi secondarie	6
Traversi superiori	12
Soletta	2

Tabella 5.1: Elementi sintetici considerati nell'analisi

Gli esiti delle ispezioni sintetiche del primo anno della serie temporale sono riportati nella seguente tabella, sia in termini di difettosità relativa D_R che in termini di Indice di Performance $IP(\%) = \left(1 - \frac{D_R}{D_{R,MAX}}\right) \cdot 100$, e sono forniti, come sopraccitato, dai dati delle schede di difettosità reali del ponte esistente in oggetto.

	D_R	$D_{R,max}$	IP (%)
Spalle	4.08	64	94%
Pile	2.8	71	96%
Giunti	1	9	89%
Piedritti	8.4	46	82%
Archi	7.4	40	82%
Travi longitudinali	8.2	61	87%
Traversi inferiori	5.4	61	91%
Travi secondarie	2.2	61	96%
Traversi superiori	12	61	80%
Soletta	5.4	35	85%

Tabella 5.2: Difettosità relativa e Indice di Performance del primo anno di ispezioni

Si è supposto che il primo anno di ispezioni sia avvenuto il 2020. Successivamente è stato ricostruito sinteticamente il dataset nelle modalità descritte nel paragrafo precedente. In particolare, per ciascun elemento è stato supposto che siano eseguite delle ispezioni con cadenza biennale, pari alla frequenza minima prevista nel §7 delle Linee Guida, per vent'anni, cioè dal 2020, anno della prima ispezione, al 2040, anno dell'ultima ispezione. La previsione

dell'andamento dell' IP è stata ottenuta per ogni elemento considerando i successivi vent'anni a partire dall'ultima ispezione, ossia dal 2040 al 2060.

In seguito, è riportata l'analisi eseguita per l'elemento trave longitudinale avente $D_R = 8.2$ e $IP = 87\%$ nel 2020. La curva di degrado, la velocità e l'accelerazione negli istanti successivi della serie temporale sono generate sinteticamente. I grafici ottenuti sono presentati nelle seguenti figure. I parametri di accelerazione e velocità iniziali sono circa pari a zero nel rispetto dei vincoli legati alle caratteristiche qualitative e quantitative del deterioramento.

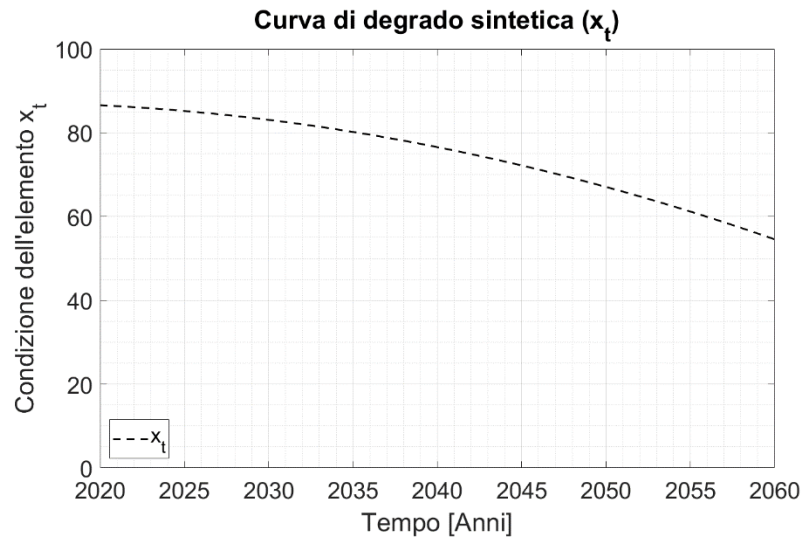


Figura 5.15: Curva dell' IP sintetico

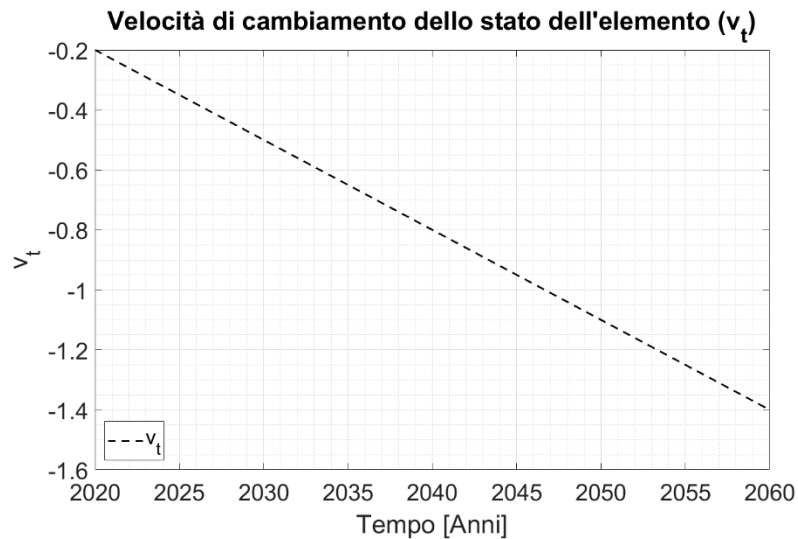


Figura 5.16: Velocità di cambiamento dell' IP sintetico

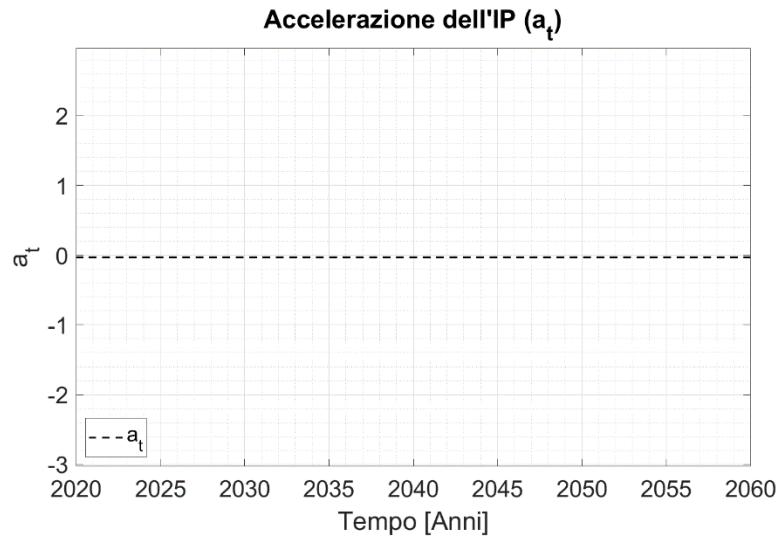


Figura 5.17: Accelerazione dell'IP sintetico

L'andamento sintetico dell'Indice di Performance parte dal dato riportato in tabella pari a 87%. Il valore decresce, in quanto il fenomeno del degrado è monotono decrescente, fino ad arrivare nel 2060 ad un valore pari a $x_t = 55\%$.

Per le caratteristiche del sistema cinematico che descrive il modello di transizione, come descritto nella metodica, l'accelerazione è costante e circa pari a zero mentre la velocità è lineare.

Sulla curva che riporta l'andamento dell'indice di performance IP sono campionati gli esiti delle ispezioni visive y_{obs} . Ciascuna ispezione è estratta da una distribuzione normale di media 0 e varianza $\sigma_v^2 \sim U(1,6)$.

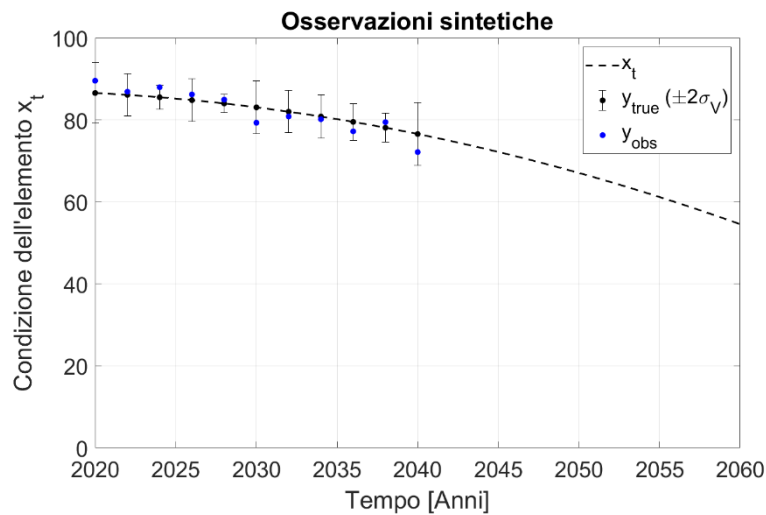


Figura 5.18: Insieme dei dati sintetici generato per l'elemento "Travi Longitudinali"

Sulla base degli esiti sintetici delle ispezioni si predice l'andamento dell'IP dell'elemento con il modello spazio di stato. La curva stimata è presentata in rosso nel seguente grafico. In verde sono riportati gli intervalli di confidenza $\pm\sigma_m$ e $\pm 2\sigma_m$.

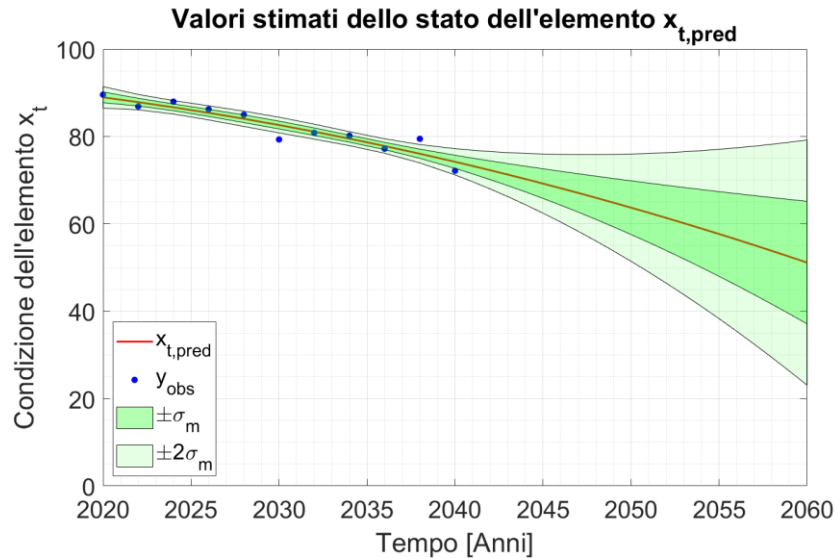


Figura 5.19: Andamento dell'indice di performance predetto dal modello

Per avere una chiave di lettura ulteriore, è possibile valutare la capacità di predizione del modello confrontando la curva stimata dal modello con la curva sintetica tratteggiata in nero. La curva sintetica rappresenta l'andamento reale della condizione dell'elemento e, pertanto, la curva stimata dovrà quanto più avvicinarvi.

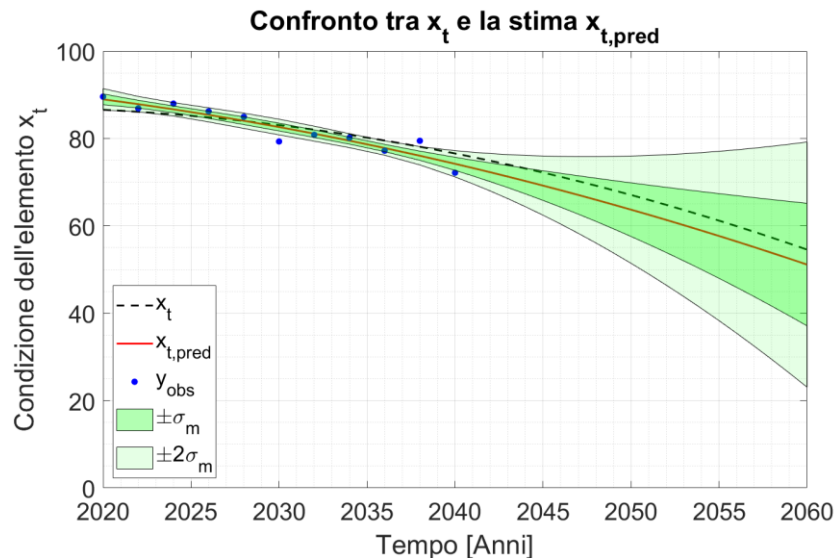


Figura 5.20: Confronto tra l'andamento dell'indice di performance predetto dal modello (in rosso) e quello sintetico (tratteggiato in nero)

Come si può riscontrare, la curva sintetica ricade all'interno dell'intervallo di confidenza e, quindi, la stima predetta dal modello è coerente con quanto atteso. È, dunque, verificata la buona capacità di predizione del modello. Per rendere più chiara ed immediata la lettura della differenza tra le due curve, si presenta nella seguente figura un grafico a dispersione che riporta sulle ascisse il valore sintetico dello stato dell'elemento e sulle ordinate quello stimato dal modello.

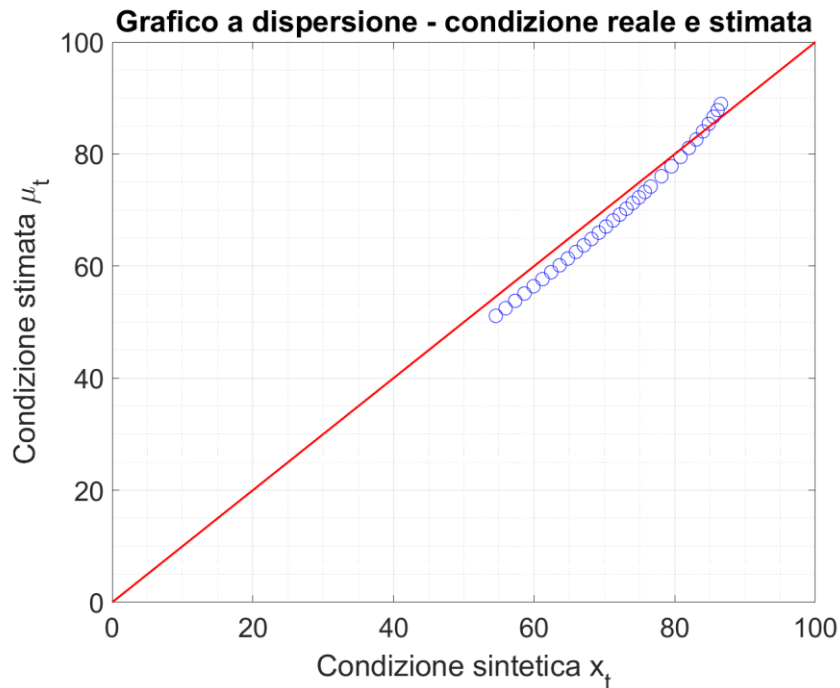


Figura 5.21: Grafico a dispersione della condizione stimata dal modello e quella sintetica

Si può notare come le coppie (x_t, μ_t) si allineano sulla retta in rosso inclinata di 45° andando a provare quanto precedentemente affermato.

Ottenuta la curva stimata dal modello, è stata eseguita una fase di post – processamento dei risultati. In accordo con quanto previsto dal §7.7 delle nuove Linee Guida 2020, è stata costruita la Carta di Controllo dell'elemento. In particolare, con riferimento ai principi di controllo statistico della qualità, sono stati definiti i seguenti limiti: valore atteso corrispondente al valore predetto dal modello; soglia di attenzione corrispondente all'intervallo di confidenza $[-\sigma; +\sigma]$; soglia di allarme corrispondente all'intervallo di confidenza $[-2\sigma; +2\sigma]$.

La carta di controllo così ottenuta è riportata nella seguente figura. In rosso è definita la soglia di allarme, in giallo quella di attenzione e in verde il valore atteso. Nel caso in cui l'esito della nuova ispezione dovesse ricadere al di fuori della soglia di attenzione o di allarme, è necessario che il gestore del ponte incaricato di eseguire le ispezioni adotti dei provvedimenti per accertarsi del motivo di un risultato così discostato dal valore.

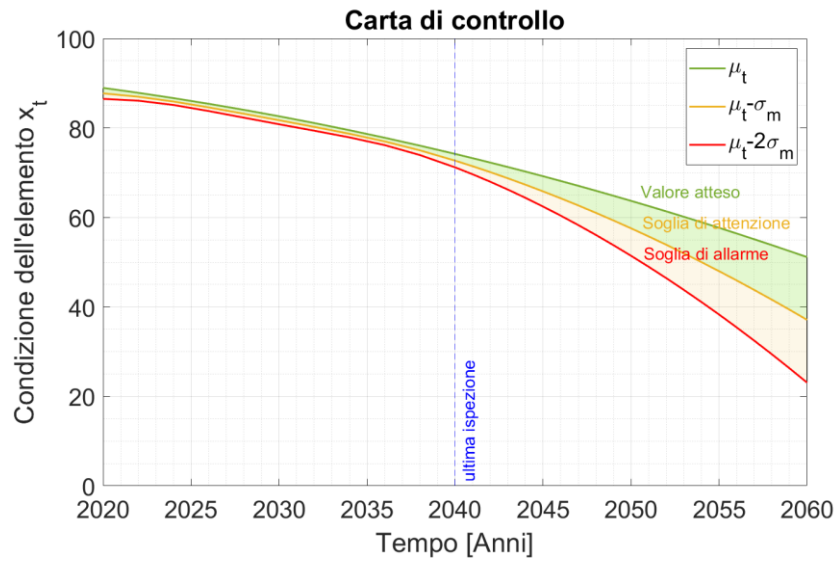


Figura 5.22: Carta di controllo dell'elemento "Trave Longitudinale"

L'effettivo vantaggio della stima della performance dell'elemento nel tempo si rivela evidente nella previsione della Classe di Attenzione dell'elemento, come previsto dal capitolo §7.7 delle nuove Linee Guida 2020 e descritto precedentemente nella metodica adottata. Di seguito si presentano due grafici che riportano la previsione della CdA dell'elemento "Trave Longitudinale" sia in termini di difettosità relativa D_R , risultato diretto ottenuto dalle schede di difettosità redatte in fase di ispezione, che in termini di Indice di Performance, parametro impiegato nell'analisi.

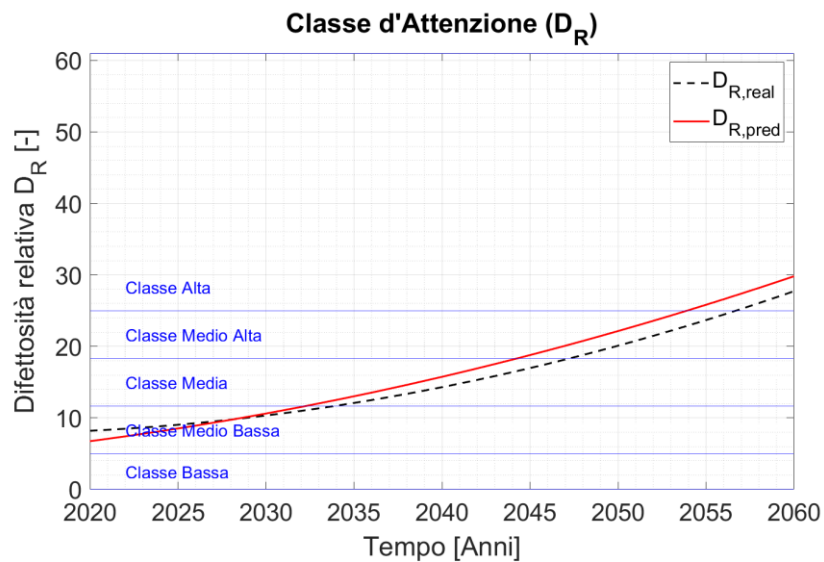


Figura 5.23: Previsione della Classe di Attenzione dell'elemento "Trave Longitudinale" in termini di Difettosità Relativa D_R

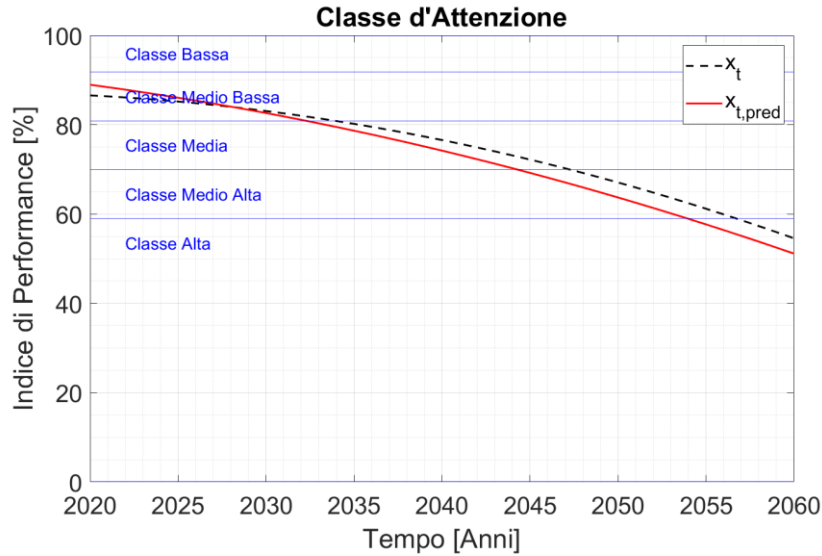


Figura 5.24: Previsione della Classe di Attenzione dell'elemento "Trave Longitudinale" in termini di Indice di Performance IP (%)

5.4.3 Stima della performance dell'opera

Per ciascun elemento è possibile determinare la Classe di Attenzione e, sulla base della previsione fornita dal modello dell'andamento dell'Indice di Performance, si può determinare una stima della variazione della CdA.

Si riportano per ciascun elemento i risultati riferiti al primo anno di ispezione. In particolare, nella seguente tabella sono presentati i nomi e il numero di elementi ispezionati, la difettosità relativa D_R con il suo valore massimo, l'indice di performance e la CdA in riferimento all'anno 2020.

	N° elementi	D_R	$D_{R,max}$	IP	CdA (2020)
Spalle	2	4.08	64	94	Bassa
Pile	1	2.8	71	96	Bassa
Giunti	3	1	9	89	Bassa
Piedritti	1	8.4	46	82	Medio-Bassa
Archi	4	7.4	40	82	Medio-Bassa
Travi Longitudinali	4	8.2	61	87	Medio-Bassa
Traversi Inferiori	12	5.4	61	91	Medio-Bassa
Travi Secondarie	6	2.2	61	96	Bassa
Traversi Superiori	12	12	61	80	Media
Soletta	2	5.4	35	85	Medio-Bassa

Tabella 5.3: CdA per ogni elemento strutturale determinate nell'anno 2020

Per una visualizzazione più efficace, si presentano i dati nel seguente istogramma. Sulle ascisse sono definite le CdA, da Bassa ad Alta, mentre sulle ordinate è riportato il numero di elementi appartenenti a ciascuna classe per l'anno 2020.

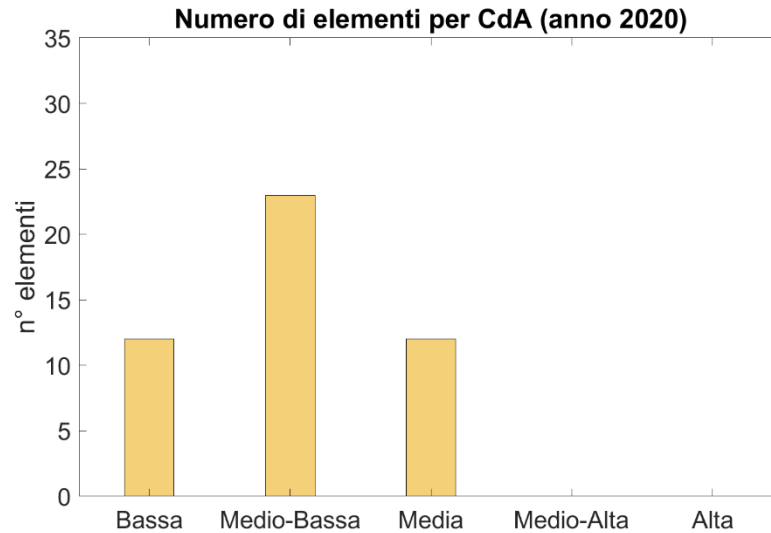


Figura 5.25: Istogramma del numero di elementi in ciascuna CdA per l'anno 2020

In analogia al grafico precedente, a partire dalle curve di previsione fornite dal modello per ciascun elemento strutturale, è determinata la percentuale di elementi in ciascuna Classe di Attenzione per ogni anno di ispezione. I risultati sono presentati nella tabella seguente.

Percentuale di elementi per ogni CdA					
	Bassa	Medio - Bassa	Media	Medio - Alta	Alta
2020	26%	49%	26%	0%	0%
2022	26%	49%	26%	0%	0%
2024	26%	49%	26%	0%	0%
2026	26%	49%	26%	0%	0%
2028	6%	68%	26%	0%	0%
2030	6%	64%	30%	0%	0%
2032	6%	64%	30%	0%	0%
2034	2%	68%	30%	0%	0%
2036	2%	66%	32%	0%	0%
2038	2%	53%	45%	0%	0%
2040	0%	45%	55%	0%	0%
2042	0%	36%	64%	0%	0%
2044	0%	36%	60%	4%	0%
2046	0%	2%	62%	36%	0%
2048	0%	0%	64%	36%	0%
2050	0%	0%	62%	38%	0%
2052	0%	0%	57%	43%	0%

Applicazione del ML ai dati sintetici delle ispezioni visive

2054	0%	0%	2%	98%	0%
2056	0%	0%	2%	57%	40%
2058	0%	0%	0%	57%	43%
2060	0%	0%	0%	57%	43%

Tabella 5.4: Percentuale di elementi per ogni CdA e per ogni anno di ispezione

Per rendere una lettura più comprensibile dei risultati, si riportano gli istogrammi che riportano il numero di elementi appartenenti a ciascuna CdA riferiti agli anni 2026, 2030, 2040, 2050, 2056 e, infine, 2060. In questo modo è possibile visualizzare graficamente l'andamento del deterioramento del ponte rappresentato dal passaggio del numero di elementi dalle classi più basse a quelle più alte.

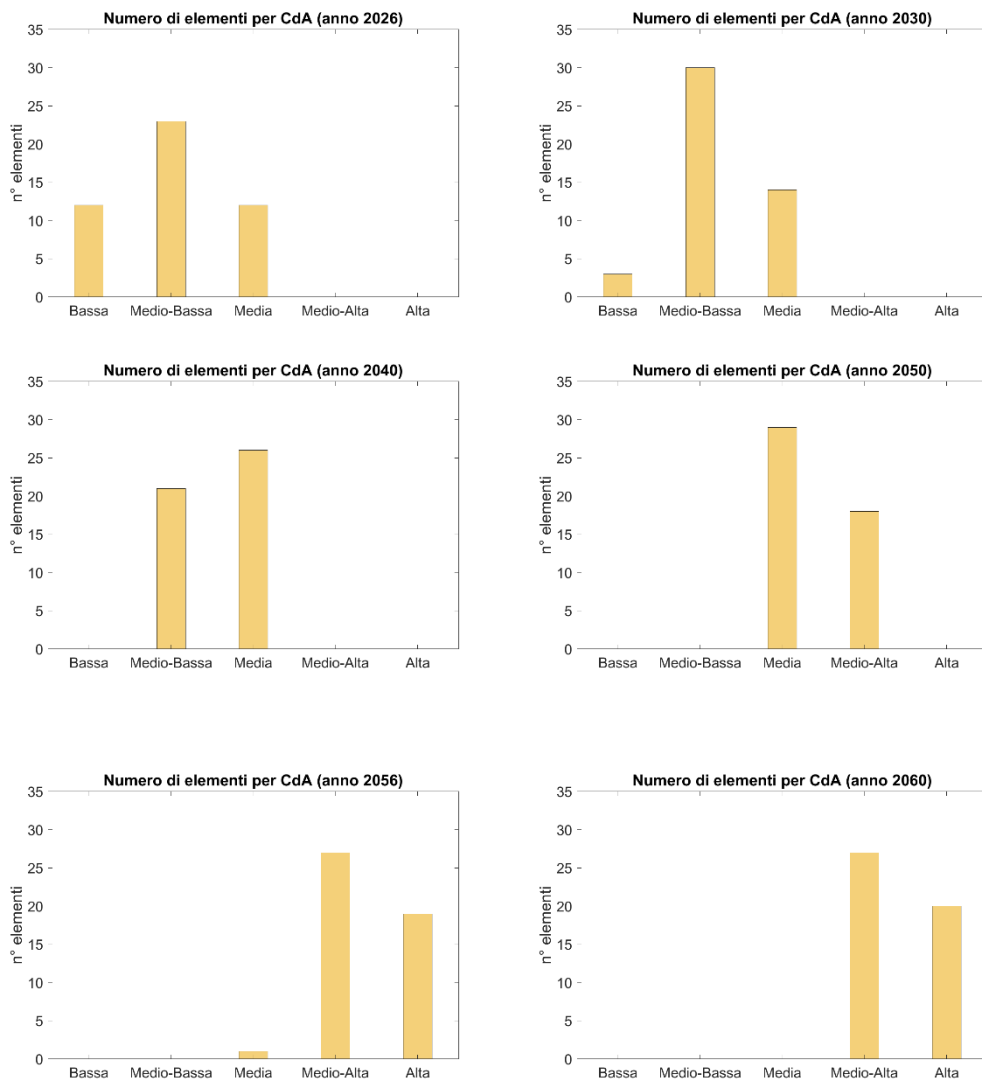


Figura 5.26: Andamento nel tempo del numero di elementi in ciascuna CdA

Si può notare come, nei primi anni di ispezione, non ci sono elementi appartenenti alle classi più alte. Viceversa, a seguito dell'aumento del degrado della struttura, gli ultimi anni la Classe di Attenzione elementi strutturali si sposta dalle più basse alle più alte. Infatti, la totalità di quest'ultimi si trova in classe Medio – Alta o Alta.

A partire dai risultati riferiti ai singoli elementi strutturali e presentati nella tabella precedente e negli istogrammi, si definisce un Indice di Performance riferito all'intera opera applicando la Teoria dell'utilità attesa di von Neumann e Morgenstern citata nel paragrafo precedente.

Nella fattispecie, si propongono i valori dell'utilità u_k corrispondenti a ciascuna percentuale di elementi in ogni CdA pari a $u_1 = 1$, $u_2 = 0.75$, $u_3 = 0.5$, $u_4 = 0.25$ e $u_5 = 0$. La performance dell'opera coincide con l'utilità attesa $U(p) \equiv IP_{opera}$ ed è calcolata come:

$$IP_{opera} = \sum u(x_k)p_k = 1 \cdot p_1 + 0.75 \cdot p_2 + 0.5 \cdot p_3 + 0.25 \cdot p_4 + 0 \cdot p_5 \quad (5.19)$$

dove p_k è la percentuale di elementi in ciascuna Classe di Attenzione definita nella tabella precedente. La formula è valutata per ogni anno di ispezione in modo tale da avere un andamento nel tempo dell' IP dell'opera. I risultati sono presentati nella seguente tabella e, per una maggiore chiarezza, sono rappresentati nel grafico seguente che riporta sulle ascisse l'asse temporale e sulle ordinate l' IP_{opera} .

	IP_{opera}
2020	75%
2022	75%
2024	75%
2026	75%
2028	70%
2030	69%
2032	69%
2034	68%
2036	68%
2038	64%
2040	61%
2042	59%
2044	58%
2046	41%
2048	41%
2050	40%
2052	39%
2054	26%
2056	15%
2058	14%
2060	14%

Tabella 5.5: IP riferito all'opera calcolato con la teoria dell'utilità attesa

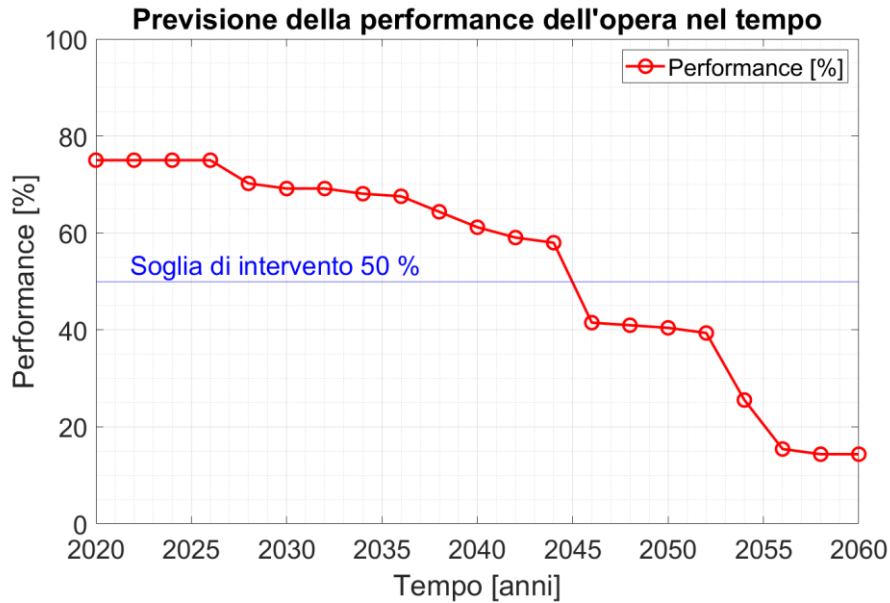


Figura 5.27: Previsione dell'andamento dell' IP_{opera} nel tempo con la teoria dell'utilità attesa

Nota la previsione della performance dell'opera nel tempo è possibile stabilire una soglia raggiunta la quale programmare gli interventi di manutenzione sul ponte. La soglia di intervento può essere definita prendendo in considerazione i parametri del *Bridge Management System* utilizzato dal gestore dell'opera ovvero considerando i costi di intervento, manutenzione e gestione del manufatto. Nel grafico precedente è stata impostata la soglia al 50% e, conseguentemente, l'anno in cui è previsto l'intervento risulta essere il 2045.

Si può estendere l'analisi al livello *network* ossia all'intera rete infrastrutturale in cui è inquadrato il ponte ispezionato al fine di trarre delle considerazioni più ampie in merito alla gestione ottimizzata del sistema di viabilità complessivo.

In altre parole, definendo l'andamento della performance di ciascun ponte appartenente alla stessa rete, è possibile avere un quadro generale del deterioramento del parco infrastrutturale in gestione all'Ente preposto non solo al *bridge – level* ma anche al *network – level*.

5.5 Conclusioni

Nel presente capitolo è stata descritta la metodica con la quale è stato applicato il modello spazio di stato agli esiti sintetici delle ispezioni visive e con cui è stata ottenuta la previsione della performance nel tempo sia del singolo elemento che, complessivamente, dell'opera.

Il modello è stato implementato su Matlab attraverso un codice opensource chiamato OpenBDLM e sviluppato da I. Gaudot, L. Ha Nguyen, S. Khazaeli, e J.-A. Goulet [55]. È stato realizzato un codice in Matlab per la fase di pre – processamento dei dati, ovvero per la creazione del dataset sintetico con cui è stata svolta l'analisi, e per la fase di post – processamento, ossia per

la creazione delle carte di controllo e l'aggiornamento della Classe di Attenzione nel tempo come previsto dalle nuove Linee Guida 2020.

I risultati della previsione della Classe di Attenzione per ogni elemento sono stati elaborati per fornire l'indicazione della performance complessiva dell'opera. In particolare, è stato definito un Indice di Performance del ponte applicando l'approccio definito dalla teoria dell'utilità attesa di von Neumann e Morgenstern. Infatti, è stata assegnata un valore di utilità, ossia un peso, a ciascuna Classe di Attenzione dell'elemento attraverso cui è stato ricavato la previsione nel tempo dell'indicatore di performance dell'opera.

In sintesi, di seguito si presenta il diagramma di flusso che riporta i passi seguiti nell'analisi sia al livello – elemento che al livello – opera.

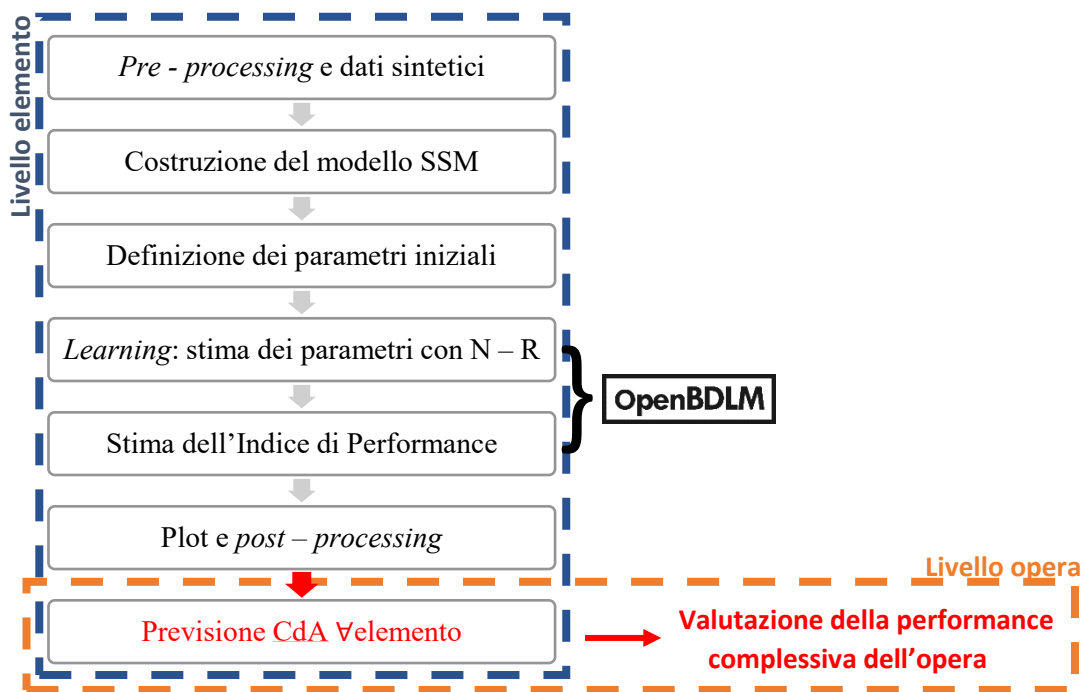


Figura 5.28: Diagramma di flusso dei passi seguiti nell'applicazione del modello

Attraverso i risultati ottenuti, il gestore del ponte può programmare gli interventi di manutenzione definendo una soglia di intervento in termini di performance. È possibile estendere l'analisi della singola opera a tutti i ponti della rete infrastrutturale in modo da avere un quadro generale del deterioramento del parco infrastrutturale in gestione all'Ente preposto e pianificare una programmazione delle ispezioni e degli interventi ad ampio respiro.

6 Conclusioni

Il compito dell'Ente gestore di una rete infrastrutturale è quello di estrapolare le relazioni tra il deterioramento delle opere e gli esiti delle ispezioni e del monitoraggio in modo da prendere una decisione sui futuri interventi da eseguire per mantenere un livello adeguato di performance della struttura. Al fine di ottenere una predizione del degrado delle strutture, nel presente elaborato di tesi è proposta l'applicazione dell'Intelligenza Artificiale agli esiti delle ispezioni visive dei ponti.

L'Intelligenza Artificiale si declina in più livelli come, ad esempio, il *Deep Learning* e il *Machine Learning (ML)*. Il modello presentato è basato su tecniche di *ML* in quanto ben adattabili alla tipologia dei dati forniti dalle ispezioni visive. La caratteristica principale del *ML* è spostare l'attività di apprendimento dei parametri in un processo decisionale dall'operatore umano al computer. Questi strumenti sono ormai diffusi in molti campi dell'ingegneria e, senz'altro, quotidianamente toccano ormai tutti noi nella vita di tutti i giorni. Tuttavia, nell'ambito della gestione dei ponti il *ML* ha avuto modiche applicazioni se non in recentissimi studi, specialmente in Italia. Infatti, dall'analisi dello stato di fatto della manutenzione delle opere in Italia, presentata nel secondo capitolo dell'elaborato, è emerso che il fragile patrimonio dei ponti esistenti risulta essere in condizioni precarie, visti i recenti crolli e date le articolate modalità di pianificazione degli interventi di manutenzione. In realtà, il processo di manutenzione dei ponti esistenti in Italia risulta particolarmente complesso e, pertanto, molto spesso il criterio con il quale viene pianificata la manutenzione è di tipo emergenziale, ossia l'intervento è eseguito quando l'opera è in condizioni di degrado avanzato.

Data questa situazione di urgenza, il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha emanato nel 2020 le nuove Linee Guida per cercare di armonizzare i diversi strumenti per la definizione degli interventi di manutenzione a disposizione dei gestori dei ponti italiani e, dunque, aiutare quest'ultimi nel processo decisionale in maniera efficace evitando un inutile spreco di risorse economiche e intellettuali. Gli strumenti operativi previsti dalle nuove Linee Guida 2020 per garantire una corretta gestione delle infrastrutture si basano sulle ispezioni visive, sul monitoraggio strumentale e sui sistemi di gestione dei dati e delle informazioni chiamati *Bridge Management Systems (BMS)*. Il BMS è lo strumento a supporto delle decisioni dell'Ente manutentore per pianificare gli interventi da eseguire in funzione della priorità e dei costi della manutenzione. Nel terzo capitolo è stato descritto lo stato di fatto degli attuali sistemi di gestione dei ponti sul panorama internazionale e italiano.

Un elemento imprescindibile per il sistema di gestione dei ponti è il modello predittivo del degrado dell'opera. Quest'ultimo è realizzato implementando una struttura basata su modelli meccanici, deterministici oppure stocastici. I modelli più diffusi negli attuali BMS sono quelli stocastici. Nei software commerciali, in particolare, sono implementate le catene di Markov per predire le condizioni future dell'opera. Recenti studi in letteratura, inoltre, hanno mostrato l'applicazione di modelli di regressione per la stima del degrado nel tempo. Tuttavia, sia il

processo markoviano che i modelli basati sulle regressioni presentano delle limitazioni se applicati nel peculiare contesto delle ispezioni visive e dei modelli di degrado.

Pertanto, nel presente elaborato di tesi è presentata l'applicazione, nell'ambito del *ML*, dei modelli dinamici spazio di stato agli esiti delle ispezioni visive per la previsione delle curve di degrado in modo da superare alcune limitazioni dei metodi stocastici impiegati allo stato dell'arte attuale. Nel quarto capitolo sono mostrate le basi teoriche del modello implementato.

La metodica e i risultati dell'applicazione del modello sono riportati e discussi nel quinto capitolo. Il modello è stato implementato su Matlab attraverso un codice opensource chiamato OpenBDLM e sviluppato da I. Gaudot, L. Ha Nguyen, S. Khazaeli, e J.-A. Goulet. È stato realizzato un codice in Matlab per la fase di pre – processamento dei dati, ovvero per la creazione del dataset sintetico con cui è stata svolta l'analisi in quanto non si dispone di dati reali, e per la fase di post – processamento, ossia per la creazione delle carte di controllo e l'aggiornamento della Classe di Attenzione nel tempo come previsto dalle nuove Linee Guida 2020. I risultati della previsione della Classe di Attenzione per ogni elemento sono stati elaborati per fornire l'indicazione della performance complessiva dell'opera. In particolare, è stato definito un Indice di Performance del ponte applicando l'approccio definito dalla teoria dell'utilità attesa di von Neumann e Morgenstern. Infatti, è stato assegnato un valore di utilità, ossia un peso, a ciascuna Classe di Attenzione dell'elemento attraverso cui è stata ricavata la previsione nel tempo dell'indicatore di performance dell'opera.

Attraverso i risultati ottenuti, il gestore del ponte può programmare gli interventi di manutenzione definendo una soglia di intervento in termini di performance. È possibile estendere l'analisi della singola opera a tutti i ponti della rete infrastrutturale in modo da avere un quadro generale del deterioramento del parco infrastrutturale in gestione all'Ente preposto e pianificare una programmazione delle ispezioni e degli interventi ad ampio respiro.

Dai risultati è emerso che i principali vantaggi dell'applicazione dei modelli spazio di stato alle ispezioni visive consistono in: una buona e robusta capacità di predizione nonostante dataset caratterizzati da una discreta rumorosità e pochi dati; nell'aggiornamento *online* della stima predetta, vale a dire che, ogni qualvolta è disponibile l'esito di una nuova ispezione visiva, aumenta la conoscenza della condizione del ponte e, dunque, diminuisce l'incertezza legata alla predizione del modello.

Il presente elaborato di tesi si propone come una presentazione critica e non esaustiva dello stato di fatto della gestione dei ponti in Italia e sul panorama internazionale, mostrando una raccolta dei recenti studi e dei riferimenti presenti in letteratura. Vuole, pertanto, essere un'introduzione alla tematica del *ML* applicato agli esiti delle ispezioni visive per predire il degrado dei ponti esistenti e garantire una corretta gestione della rete infrastrutturale. Come sviluppi futuri, si possono approfondire gli aspetti riguardanti l'inizializzazione e la stima dei parametri del modello di degrado e, come suggerito anche in letteratura, valutare gli effetti successivi agli interventi di manutenzione del ponte per un aggiornamento dell'Indice di Performance e, dunque, della Classe di Attenzione.

Bibliografia

- [1] A. Pipinato, “Nuovi approcci per il management, la manutenzione ed il controllo delle reti di ponti,” *Rivista Strade e Autostrade*, 2008.
- [2] W. Salvatore, “Valutazione del rischio strutturale dei ponti nelle reti infrastrutturali,” 2019.
- [3] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, “Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti,” 2020.
- [4] M. A. Zanini, “Gestione di ponti e viadotti. L’utilizzo di Bridge Management System,” 2020.
- [5] CIAS, “Manuale per la valutazione dello stato dei ponti,” 2018.
- [6] Z. Hamida, “Stochastic Modelling of Infrastructures Deterioration and Interventions based on Network-Scale Visual Inspections,” 2020.
- [7] Z. Hamida and J. A. Goulet, “Modeling infrastructure degradation from visual inspections using network-scale state-space models,” *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 27, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1002/stc.2582.
- [8] S. Martinello, “Analisi critica dei metodi di valutazione numerica dei ponti,” 2020.
- [9] M. Bruneau *et al.*, “A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities,” *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 733–752, Nov. 2003. doi: 10.1193/1.1623497.
- [10] W. Zhang, N. Wang, and C. Nicholson, “Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 13, no. 11, pp. 1404–1413, Nov. 2017, doi: 10.1080/15732479.2016.1271813.
- [11] “Tutti i ponti crollati in Italia negli ultimi anni,” Apr. 09, 2020. <https://www.agi.it/cronaca/news/2020-04-09/ponti-crollo-ponte-morandi-la-spezia-massa-caprigliola-8280157/> (accessed Nov. 13, 2021).
- [12] “Ponti crollati in Italia, i disastri più recenti: dal Morandi a quello di Albiano Magra,” Apr. 08, 2020. <https://tg24.sky.it/cronaca/approfondimenti/ponti-crollati-italia#13> (accessed Nov. 13, 2021).
- [13] “Frana la montagna, crolla un viadotto sull’autostrada Torino-Savona,” Nov. 24, 2019. https://www.gazzettadiparma.it/italiamondo/2019/11/24/news/crolla_un_viadotto_sull_utostrada_torino-savona-2180349/ (accessed Nov. 16, 2021).
- [14] P. Sapienza, “Un sistema di supporto alle decisioni per la gestione della manutenzione dei ponti di una rete viaria,” 2005.

- [15] Ministero dell'Interno, "Circolare n° 6736/61/AI del 19.07.1967," 1967.
- [16] Ministero dei Lavori Pubblici, "Circolare Ministero dei Lavori Pubblici 25 febbraio 1991, n. 34233," 1991.
- [17] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Norme tecniche per le costruzioni 2008," 2008.
- [18] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Circolare applicativa NTC2018," 2019.
- [19] "Sorveglianza e manutenzione delle opere d'arte autostradali," 2017. <https://www.stradeautostrade.it/strade-e-autostrade/sorveglianza-e-manutenzione-delle-opere-darte-autostradali/6/> (accessed Nov. 13, 2021).
- [20] R. J. Woodward, "Derivable D14 Final Report (BRIME)," 2001.
- [21] C. Bertoluzza, "Valutazione numerica dei degradi," 2005.
- [22] "Il software weBridge," 2021. <https://www.ispezione Ponti.it/manuale/> (accessed Nov. 13, 2021).
- [23] H. Hatem and E. Elbehairy, "Bridge management system with integrated life cycle cost optimization," 2007.
- [24] W. Robert, A. Marshall, R. Shepard, and J. Aldayuz, "The pontis bridge management system: State-of-the-practice in implementation and the pontis bridge management system: State-of-the-practice in implementation and development," *Proceedings of the 9th International Bridge Management Conference*, Nov. 2002.
- [25] "Informazioni sul BMS," 2021. www.bms.provincia.tn.it/bms/informazioni/ (accessed Nov. 13, 2021).
- [26] I. Srikanth and M. Arockiasamy, "Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 2, pp. 152–173, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.JTTE.2019.09.005.
- [27] K. Nickless and R. Atadero, "Mechanistic Deterioration Modeling for Bridge Design and Management," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 23, Nov. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001223.
- [28] "UNI EN 16991:2018 - Risk-Based Inspection Framework," 2018.
- [29] I. Zambon, A. Vidović, A. Strauss, and J. Matos, "Condition prediction of existing concrete bridges as a combination of visual inspection and analytical models of deterioration," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9010148.
- [30] F. Gongkank and D. Dinesh, "Methodology of homogeneous and non-homogeneous Markov chains for modelling bridge element deterioration," 2008.

- [31] J. J. Ortiz-García, Seósamh, B. Costello, and M. S. Snaith, “Derivation of Transition Probability Matrices for Pavement Deterioration Modeling,” *J. Transp. Eng.*, 2006, doi: 10.1061/ASCE0733-947X2006132:2141.
- [32] G. Morcous, “Performance Prediction of Bridge Deck Systems Using Markov Chains,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 20, no. 2, pp. 146–155, May 2006, doi: 10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:2(146).
- [33] K. P. Murphy, “Machine Learning A Probabilistic Perspective.”
- [34] Y. Zhang, C. W. Kim, and K. F. Tee, “Maintenance management of offshore structures using Markov process model with random transition probabilities,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 13, no. 8, pp. 1068–1080, Aug. 2017, doi: 10.1080/15732479.2016.1236393.
- [35] L. R. Rabiner and B. H. Juang, “An introduction to Hidden Markov Models,” *IEEE ASSP Magazine*, 1986.
- [36] Y.-H. Huang, “Artificial Neural Network Model of Bridge Deterioration,” 2010, doi: 10.1061/ASCECF.1943-5509.0000124.
- [37] J. Lee, K. Sanmugarasa, M. Blumenstein, and Y. C. Loo, “Improving the reliability of a Bridge Management System (BMS) using an ANN-based Backward Prediction Model (BPM),” *Automation in Construction*, vol. 17, no. 6, pp. 758–772, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.autcon.2008.02.008.
- [38] W. R. Foster, F. Collopy, and L. H. Ungar, “Neural Network Forecasting of Short, Noisy Time Series,” 1991.
- [39] R. Matkovskyy and T. Bouraoui, “Application of Neural Networks to Short Time Series Composite Indexes: Evidence from the Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs (NARX) Model,” *Journal of Quantitative Economics*, vol. 17, Nov. 2018, doi: 10.1007/s40953-018-0133-8.
- [40] N. See-King and F. Moses, “Bridge deterioration modeling using semi-markov theory,” *Structural Safety and Reliability*, 1998.
- [41] P. L. Durango-Cohen, “A time series analysis framework for transportation infrastructure management,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, no. 5, pp. 493–505, Jun. 2007, doi: 10.1016/J.TRB.2006.08.002.
- [42] I. Zambon, A. Vidovic, A. Strauss, J. Matos, and J. Amado, “Comparison of stochastic prediction models based on visual inspections of bridge decks,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 23, no. 5, pp. 553–561, Jul. 2017, doi: 10.3846/13923730.2017.1323795.
- [43] J. Goulet, “Probabilistic Machine Learning for Civil Engineers,” *The MIT press*, 2020.
- [44] Z. Hamida and J. Goulet, “State-Space Models for Network-Scale Analysis of Bridge Inspection Data,” 2019.

- [45] Z. Hamida and J.-A. Goulet, “Quantifying the Effects of Interventions Based on Visual Inspections from a Network of Bridges,” 2021.
- [46] R. E. Kalman, “Contributions to the Theory of Optimal Control,” 1960.
- [47] Y. Bar-Shalom, X. Li, and T. Kirubarajan, “Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software,” 2001.
- [48] A. Galã, “The theory of Newton’s method,” 2000. [Online]. Available: www.elsevier.nl/locate/cam
- [49] S. Akram and Q. ul Ann, “Newton-Raphson-Method,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, no. 7, 2015, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [50] H. E. Rauch, F. Tung, and C. T. Striebel, “Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems,” *AIAA Journal*, vol. 3, no. 8, pp. 1445–1450, 1965, doi: 10.2514/3.3166.
- [51] H. A. P. Blom and Y. Bar-Shalom, “The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 33, no. 8, pp. 780–783, 1988, doi: 10.1109/9.1299.
- [52] C.-J. Kim and C. Nelson, *State-Space Models with Regime Switching: Classical and Gibbs-Sampling Approaches with Applications*, 1st ed., vol. 1. The MIT Press, 1999. [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:mtp:titles:0262112388>
- [53] L. H. Nguyen and J. A. Goulet, “Anomaly detection with the Switching Kalman Filter for structural health monitoring,” *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 25, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1002/stc.2136.
- [54] J. A. Goulet, “Bayesian dynamic linear models for structural health monitoring,” *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 24, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1002/stc.2035.
- [55] I. Gaudot, L. Ha Nguyen, S. Khazaeli, and J.-A. Goulet Assistant, “OpenBDLM, an Open-Source Software for Structural Health Monitoring using Bayesian Dynamic Linear Models,” 2019.
- [56] I. Gaudot, L. Ha Nguyen, and J.-A. Goulet Polytechnique Montreal, “OpenBDLM V1.0 reference manual,” 2019.
- [57] Y. An, E. Chatzi, S. H. Sim, S. Laflamme, B. Blachowski, and J. Ou, “Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures,” *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 26, no. 10. John Wiley and Sons Ltd, Oct. 01, 2019. doi: 10.1002/stc.2416.
- [58] J. von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of games and economic behavior*, 2nd rev. ed. Princeton, NJ, US: Princeton University Press, 1947.
- [59] M. J. Machina, “Choice under Uncertainty: Problems Solved and Unsolved,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 1, no. 1, pp. 121–154, Sep. 1987, doi: 10.1257/jep.1.1.121.