

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Civile

## Tesi di Laurea Magistrale

Analisi funzionale delle *Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti*, confronto con procedure analoghe, introduzione di metodologie avanzate di ispezione e implementazione UML



Relatore:  
prof. Gabriele Bertagnoli

Candidato:  
Francesco Scarpato  
S243264

Anno Accademico 2020/2021





# Sommario

I collassi strutturali avvenuti nel corso degli ultimi anni e portati alla ribalta della cronaca hanno messo in luce la necessità di interventi strutturali urgenti su numerosi ponti e viadotti della rete stradale e autostradale nazionale aperti alla circolazione. A livello normativo non sono stati chiariti in passato i procedimenti da adottare su opere che hanno superato la vita attesa di progetto, né definita una coerente politica di adeguamento delle infrastrutture esistenti.

Per garantire la funzionalità e la sicurezza delle opere è necessaria una corretta pianificazione delle ispezioni e degli interventi, verifiche periodiche della struttura, analisi dei rischi ed interventi di manutenzione adeguati. Infatti, i software di Bridge Management System più recenti non soltanto racchiudono informazioni e documenti sulle infrastrutture, ma sono in grado di definire il programma di manutenzione più adeguato per ogni opera e definire un ordine di priorità delle attività. Nella prima parte del lavoro di tesi viene analizzata la fase ispettiva e in particolare sono descritti i vantaggi dell'integrazione di droni in fase di ispezione visiva e come supporto ai processi di gestione e manutenzione dei ponti esistenti. A tal fine, viene indagata la possibilità di ottenere modelli tridimensionali in scala delle strutture ispezionate mediante rilievo fotogrammetrico eseguito da drone.

Nella seconda parte del lavoro di tesi si analizza la fase di valutazione del danno sulle strutture e la definizione di indici dello stato di condizione del ponte. I principali metodi di calcolo esistenti per la quantificazione del danno nei ponti esistenti vengono messi a confronto per evidenziarne i vantaggi e svantaggi.

Nella terza parte del lavoro viene sviluppato un applicativo software in grado, grazie al riconoscimento automatico del danno, di identificare fessure all'interno di fotografie scattate su strutture in calcestruzzo armato. Il metodo di rilevamento delle fessure proposto è costituito da due elementi fondamentali: classificazione e segmentazione delle immagini. Attraverso sviluppi futuri dell'applicativo, sarebbe possibile quantificare il danneggiamento in termini di dimensione ed estensione, al fine di eseguire autonomamente ciò che tradizionalmente viene effettuato visivamente da operatori del settore.

Nell'ultima parte della tesi si esegue un esame dei nodi decisionali previsti dalle Linee Guida per i ponti esistenti al fine di ricavarne una schematizzazione grafica funzionale. La suddivisione in differenti processi è adatta ad una futura implementazione in un software di gestione. Le tecniche di rilievo precedentemente introdotte, quali rilievo tramite drone e rilevamento del danno strutturale tramite rete neurale convolutiva, vengono anch'esse integrate nella schematizzazione dei processi.

Infine, si utilizza il linguaggio di modellizzazione unificato UML per modellare i processi decisionali previsti dalle Linee Guida sui ponti esistenti. I diagrammi delle classi, dei casi d'uso e delle attività realizzati possono essere utilizzati per una futura implementazione in un sistema di gestione dei ponti.





## Sommario

<b>Capitolo 1</b> .....	1
<b>Introduzione</b> .....	1
<b>1.1 Condizioni delle infrastrutture in Italia</b> .....	1
1.1.1 <i>Gestione delle reti stradali</i> .....	2
<b>1.2 La gestione dei ponti in Italia</b> .....	4
1.2.1 <i>Cavalcavia di Annone</i> .....	5
1.2.2 <i>Cavalcavia sull'Adriatica</i> .....	6
1.2.3 <i>Viadotto della tangenziale di Fossano</i> .....	7
1.2.4 <i>Ponte Morandi</i> .....	8
1.2.5 <i>Viadotto lungo la Torino-Savona</i> .....	9
1.2.6 <i>Ponte di Aulla di Caprigliola</i> .....	9
<b>1.3 Quadro Normativo italiano</b> .....	11
1.3.1 <i>Linee Guida per la sicurezza dei ponti</i> .....	12
<b>1.4 Le problematiche emerse dalla gestione dei ponti in Italia</b> .....	13
<b>1.5 Sistemi di gestione dei ponti nel mondo</b> .....	14
1.5.1 <i>Livelli di pianificazione dei Bridge Management System</i> .....	15
1.5.2 <i>Struttura dei Bridge Management System</i> .....	15
1.5.3 <i>Bridge Management System esistenti</i> .....	17
<b>Capitolo 2</b> .....	21
<b>Metodologie di Ispezione dei Ponti</b> .....	21
<b>2.1 Ispezioni tradizionali</b> .....	21
2.1.1 <i>Ispezioni visive negli Stati Uniti d'America</i> .....	22
2.1.2 <i>Ispezioni visive in Inghilterra</i> .....	24
2.1.3 <i>Ispezioni visive in Italia</i> .....	26
<b>2.2 Ispezioni con Droni</b> .....	27
<b>2.3 Tecnologie di restituzione di modelli tridimensionali</b> .....	28
2.3.1 <i>restituzione di modelli tridimensionali nell'ispezione di ponti</i> .....	29
2.3.1.1 <i>Rilevo fotogrammetrico mediante drone</i> .....	30
2.3.1.2 <i>Restituzione fotogrammetrica dell'oggetto</i> .....	31
2.3.1.3 <i>Vettorizzazione delle nuvole di punti</i> .....	31
2.3.1.4 <i>Ispezioni di ponti tramite droni</i> .....	32
<b>2.4 Tecnologie di restituzione di modelli in tempo reale</b> .....	33
<b>2.5 Caso studio: Rilievo e Restituzione Fotogrammetrica</b> .....	35
2.5.1 <i>Primo caso studio: Complesso di edifici</i> .....	36



2.5.1.1 Programmazione del volo.....	36
2.5.1.2 Calibrazione e incertezze sul posizionamento .....	38
2.5.1.3 Generazione della nuvola di punti.....	40
2.5.2 Secondo caso studio: complesso di edifici.....	41
2.5.2.1 Programmazione del volo.....	41
2.5.2.2 Calibrazione e incertezze sul posizionamento .....	43
2.5.2.3 Generazione della nuvola di punti.....	44
<b>2.6 Integrazione con metodologie di rilevazione del danno .....</b>	<b>45</b>
<b>Capitolo 3 .....</b>	<b>47</b>
<b>Metodologie di valutazione del danno nei ponti .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Stato di condizione dei ponti nel mondo .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.1 Valutazione del danno con il Metodo del Cias .....</b>	<b>48</b>
3.1.1.1 Programmazione degli interventi secondo il metodo del Cias.....	50
3.1.2 Metodo di Valutazione del danno di Pellegrino.....	51
3.1.2.1 Programmazione interventi secondo il metodo Pellegrino et Al.....	53
3.1.3 metodo di valutazione del danno proposto da G. Mancini .....	55
3.1.3.1 Programmazione degli interventi in base al metodo G. Mancini.....	55
3.1.4 Metodo di valutazione del danno secondo le Linee Guida per i ponti esistenti .....	56
3.1.4.1 Programmazione degli interventi secondo le Linee Guida per i ponti esistenti.....	57
3.1.5 Metodo di valutazione del danno utilizzato in Slovenia .....	59
3.1.5.1 Programmazione degli interventi in Slovenia.....	60
3.1.6 Metodo di Valutazione del danno negli Stati Uniti d'America .....	60
3.1.6.1 Programmazione degli interventi negli Stati Uniti d'America .....	64
<b>3.1.7 Metodo di valutazione del danno in Inghilterra .....</b>	<b>64</b>
3.1.7.1 Software che integrano il Bridge Condition Index .....	66
<b>3.2 Confronto tra le metodologie di valutazione esistenti .....</b>	<b>67</b>
3.2.1 Considerazioni sulle Linee guida sui ponti esistenti.....	68
<b>Capitolo 4 .....</b>	<b>71</b>
<b>Reti Neurali .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1 Apprendimento Automatico .....</b>	<b>72</b>
4.1.1 Apprendimento con Supervisione.....	73
4.1.2 Reti Neurali Artificiali .....	73
<b>4.2 Reti Neurali Convoluzionali .....</b>	<b>74</b>
4.2.1 Componenti di una Rete Neurale Convoluzionale .....	75



4.2.1.1 Moduli di Convoluzione.....	75
4.2.1.2 Moduli di Attivazione .....	77
4.2.1.3 Moduli di Pooling .....	79
4.2.1.4 Moduli di Connessione Totale .....	80
<b>4.3 Componenti della Rete Neurale.....</b>	<b>80</b>
4.3.1 Inizializzazione dei parametri del modello.....	80
4.3.2 Trasformazioni del dataset.....	80
4.3.2.1 Partizionamento del set di dati.....	81
4.3.2.2 Normalizzazione del Dataset .....	81
4.3.2.3 Image Data Augmentation.....	82
4.3.3 Aggiornamento dei pesi .....	83
4.3.3.1 Algoritmo di ottimizzazione .....	83
4.3.3.2 Funzione di Perdita nei problemi di classificazione .....	85
4.3.3.3 Regolarizzazione .....	88
4.3.3.4 Dropout.....	89
4.3.4 Ottimizzazione delle prestazioni del modello .....	90
4.3.4.1 Curve di Apprendimento e di Convalida .....	90
4.3.5 Valutazione delle prestazioni del modello .....	91
4.3.5.1 Matrice di Confusione .....	91
4.3.5.2 Accuratezza della previsione .....	92
4.3.6 Training della rete .....	93
4.3.6.1 Metodi per ridurre i tempi di training: Transfer Learning .....	93
4.3.6.2 Reti pre-addestrate per identificazione di fessure.....	94
4.3.7.1 GoogLeNet.....	95
4.3.7.2 ResNet.....	96
4.3.7.3 EfficientNet.....	96
<b>4.4 Architettura della Rete Neurale proposta .....</b>	<b>99</b>
4.4.1 Caratteristiche del modello.....	99
3.4.2 Scelta del Dataset.....	100
4.4.3 Trasformazioni applicate al dataset.....	104
4.4.4 Modalità di apprendimento .....	105
4.4.5 Scelta del modello .....	107
4.4.6 Ottimizzazione degli iperparametri .....	111
4.4.7 Risultati del modello scelto .....	112
4.4.8 Algoritmo di Segmentazione .....	113



4.4.9 Aspetti computazioni .....	115
4.4.9.1 Framework.....	115
4.4.9.2 Hardware utilizzato.....	115
<b>4.5 Conclusioni .....</b>	<b>116</b>
4.5.1 Futuri sviluppi .....	116
<b>Capitolo 5 .....</b>	<b>119</b>
<b>Analisi funzionale delle Linee guida sui ponti .....</b>	<b>119</b>
<b>5.1 Analisi dei nodi decisionali previsti dalle linee guida.....</b>	<b>120</b>
<b>5.2 Enti responsabili di attività, controlli, decisioni e comunicazioni .....</b>	<b>121</b>
5.2.1 Enti responsabili della produzione di documenti .....	121
<b>5.3 Diagrammi delle attività previste dalle Linee guida .....</b>	<b>123</b>
5.3.1 Elenco complessivo dei processi.....	124
5.3.2 Interdipendenza tra i processi.....	127
5.3.3 Processo di prioritizzazione temporanea delle attività .....	129
5.3.4 Censimento dell'opera .....	131
5.3.5 Processi di avviamento delle ispezioni .....	132
5.3.6 Processi di prioritizzazione permanenti delle attività .....	134
5.3.7 Processi ispettivi .....	138
5.3.8 Processi di valutazione dell'opera .....	142
5.3.9 Processi di aggiornamento di indici.....	148
5.3.10 Processi di prognosi.....	150
<b>5.4 Diagramma di flusso con Integrazione di strumenti di ispezione avanzati</b>	<b>152</b>
5.4.1 Diagramma riassuntivo delle attività .....	155
<b>Capitolo 6 .....</b>	<b>157</b>
<b>Implementazione UML delle Linee Guida .....</b>	<b>157</b>
<b>6.1 Basi del linguaggio.....</b>	<b>157</b>
6.1.1 Diagrammi di classe .....	158
6.1.2 Diagrammi di attività.....	160
6.1.3 Diagrammi dei casi d'uso.....	162
<b>6.2 Diagrammi di classe delle Linee Guida .....</b>	<b>163</b>
<b>6.3 Diagrammi di attività delle Linee Guida .....</b>	<b>164</b>
<b>6.4 Diagrammi dei casi d'uso delle Linee Guida.....</b>	<b>169</b>
<b>6.5 implementazione software del calcolo della Classe di Attenzione.....</b>	<b>170</b>
<b>Capitolo 7 .....</b>	<b>173</b>
<b>Conclusioni e Lavori Futuri .....</b>	<b>173</b>



<b>7.1 Conclusioni .....</b>	<b>173</b>
<b>7.2 Lavori futuri.....</b>	<b>174</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>176</b>





## Termini di Abbreviazione

<b>Termine</b>	<b>Significato</b>
CNN	Rete Neurale Convoluzionale
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
BCE	Entropia incrociata binaria
CCE	Entropia incrociata categorica
SGD	discesa del gradiente stocastica
CPU	unità centrale di elaborazione
GPU	unità di elaborazione grafica
LR	Tasso di Apprendimento
UML	Unified Modeling Language
AINOP	Archivio informatico nazionale delle opere pubbliche
ANSFISA	Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali





# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Condizioni delle infrastrutture in Italia

Il nostro Paese possiede una rete infrastrutturale molto particolare, considerata tra le più complesse al mondo. A ciò va aggiunta una spiccata vulnerabilità del territorio, sia dal punto di vista idrogeologico che sismico.

Il nostro Paese presenta infatti una conformazione geografica e orografica unica al mondo: le catene montuose delle Alpi e degli Appennini, che attraversano trasversalmente e longitudinalmente il nostro territorio, e la rete di corsi d'acqua distribuita in maniera capillare, rendono viadotti, ponti e gallerie elementi indispensabili alla viabilità <sup>1</sup>.

Oggi i tecnici sono ormai del tutto consapevoli che i materiali utilizzati per le costruzioni hanno una vita utile limitata, che può variare molto in funzione della bontà del materiale stesso ma anche dalle condizioni ambientali in cui la struttura è immersa. E' indubbio, però, che ponti e gallerie costruiti più di 50 anni fa, anche se con tecniche costruttive valide e materiali a norma, oggi possono presentare livelli di prestazione non più ottimali <sup>2</sup>.

Si contano circa un milione e mezzo di chilometri di strade la cui gestione è frammentata. La competenza della rete stradale è infatti ripartita tra Stato, Regioni, Province e Comuni, oltre che tra numerosi concessionari stradali ed autostradali. Tale frammentazione ha origine con l'emanazione del Decreto legislativo n. 112 del 1998 "Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali", con il quale lo Stato delega la responsabilità della gestione delle strade a Regioni e Province [1].

Nel territorio italiano, circa il 45% dei ponti è in capo ad Anas Spa, società di gestione delle strade statali, mentre il 20% è invece gestito dai concessionari stradali e autostradali. Il restante 35% dei ponti è invece in gestione degli enti locali (principalmente regioni e province).

La gestione e la manutenzione delle infrastrutture è quindi affidata a soggetti diversi che troppo spesso non hanno le risorse necessarie per occuparsi in maniera adeguata delle opere.

In particolare, le difficoltà incontrate dagli enti gestori nel distribuire adeguatamente il budget limitato a loro disposizione, si traduce in una definizione



non corretta della lista di priorità da seguire, portando quindi a tralasciare opere che richiedono una manutenzione immediata.

Inoltre, gli enti locali, a differenza dei concessionari autostradali i quali possono contare negli introiti dei pedaggi per la manutenzione delle loro strade, devono fare affidamento ai fondi pubblici, con tutte le problematiche di gestione che ciò comporta. Pertanto, per un piccolo Comune, anche la gestione di un unico ponte può essere difficile in assenza di fondi extra.

La ripartizione delle competenze della rete stradale comporta una frammentazione delle informazioni di tutte le opere d'arte che rende impossibile la creazione di un'anagrafe nazionale delle opere consultabile in remoto <sup>1</sup>.

Un ulteriore problema risulta dall'assenza di un gestore e quindi di un ente responsabile della manutenzione, per una porzione significativa del patrimonio stradale italiano. Sono migliaia i viadotti che non hanno ricevuto alcun tipo di manutenzione fino al momento in cui Anas Spa non si è dichiarata disposta a farsi carico della loro gestione.

Da queste motivazioni risulta evidente come la creazione di un adeguato sistema di gestione dei ponti sia necessario, prima di tutto per unificare e catalogare correttamente tutte le informazioni riguardanti le opere presenti in Italia ma anche per riuscire a effettuare una corretta distribuzione del budget a disposizione. Tale sistema di gestione, se guidato da direttive statali, sarebbe in grado di guidare e indirizzare i vari enti gestori nella corretta procedura di ispezione dei ponti e avere sempre un quadro completo di tutto il patrimonio viario.

### **1.1.1 Gestione delle reti stradali**

Da diversi anni è emerso il problema dell'assenza di un ente responsabile della manutenzione per una porzione importante del patrimonio infrastrutturale italiano <sup>3</sup>. Sono tutt'oggi ancora numerosi i ponti e viadotti la cui documentazione disponibile non permette di risalire univocamente ad un gestore dell'opera stessa.

I primi passi compiuti per la risoluzione di tale problematica risalgono al 2000, con il D.P.C.M. 21 febbraio 2000, volto all'individuazione delle strade non comprese nella rete autostradale e stradale nazionale e al loro trasferimento alle regioni. Con tale decreto è avvenuto il passaggio di circa 25.000km di strade (vale a dire oltre il 50% della rete stradale esistente) dallo Stato alle Regioni.

Secondo quanto riportato nel Conto nazionale delle infrastrutture e dei trasporti del MIT, Anni 2016-2017, il 31 dicembre 2016 l'estensione della rete stradale italiana primaria (esclusa quella comunale) era pari a 182.976km, così ripartiti:

- Autostrade 6.943km, incluse quelle in gestione ANAS;
- Altre strade di interesse nazionale 20.786km;

- Strade regionali e provinciali 155.247km.

Nel medesimo documento viene sottolineato che è ancora in atto la ripartizione e l'attribuzione giuridica di molte tra le principali strade italiane fra Statali, Regionali e Provinciali<sup>4</sup>. In particolare, nel 2017, circa 2.994 ponti che sovrappassano la rete stradale e autostradale Anas, costruiti in buona parte negli anni Sessanta, risultavano privi di ente che provvedesse alla loro manutenzione. Si tratta di ponti non in gestione Anas, per i quali ancora non si disponeva della documentazione ufficiale di proprietà<sup>5</sup>. Tra gli enti gestori della viabilità risultavano nella maggioranza dei casi Comuni, Province, Regioni, Concessionari autostradali e Consorzi. Con D.P.C.M. 20 febbraio 2018 è stata approvata la revisione della rete stradale limitatamente alle Regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Lazio, Liguria, Marche, Molise, Puglia, Toscana e Umbria che ha previsto la riclassificazione (trasferimento alla rete nazionale) di circa 3.601km e la declassificazione (da trasferire alle regioni) di circa 592km. Nel corso del 2018 sono quindi rientrati nella gestione di Anas i primi 3.500km di strade ex statali, regionali e provinciali, con oltre 1.300 ponti e più di 200 cavalcavia<sup>6</sup>, come mostrato in figura 1.1.



Figura 1.1: Suddivisione per regione dei chilometri di strade rientrate in gestione di Anas Spa nel 2018<sup>6</sup>.

Nel 2019 un numero ancora elevato di ponti resta non controllato mancando piani di manutenzione che prevedano ispezioni approfondite periodiche<sup>7</sup>. In seguito al tavolo tecnico tenutosi presso il Ministero delle Infrastrutture il 13 febbraio 2019, Anas ha dichiarato di aver inserito tutti i cavalcavia sovrappassanti la rete in gestione, nel programma di ispezione trimestrale dei ponti, indipendentemente dalla proprietà dei cavalcavia.



In seguito all'approvazione del decreto ministeriale 15 gennaio 2020, n. 27, l'Anas è stata invitata a realizzare alcuni obiettivi strategici entro l'anno 2020, tra cui “l'incremento della sicurezza della rete stradale ed autostradale, attraverso interventi di manutenzione straordinaria di ponti, viadotti e gallerie ed il monitoraggio dinamico delle opere d'arte e dei relativi cantieri” [2].

In seguito ad una Interrogazione a risposta immediata in commissione atto n. 5/03734 firmata da Fregolent Silvia in data 3 marzo 2020, l'Anas ha dichiarato di aver avviato un complesso lavoro di mappatura per individuare i responsabili della gestione e della manutenzione dei ponti e cavalcavia senza proprietario (reperimento della documentazione concernente la proprietà dei sovrappassi non di sua proprietà, reperite alcune documentazioni da Comuni e Province).

Anas è stata invitata ad estendere l'attività di monitoraggio, sia trimestrale che annuale, in presenza di rischi per la staticità del manufatto, anche a ponti e viadotti dei quali non sia nota la titolarità (in aggiunta alla ricognizione che normalmente già viene condotta sulle opere d'arte gestite). Anas è stata inoltre autorizzata ad intervenire anche su infrastrutture non di propria competenza [3]. A fine 2020 dagli archivi Anas risultano ancora 988 infrastrutture con ente responsabile della manutenzione da verificare.

## **1.2 La gestione dei ponti in Italia**

Gli eventi avvenuti nel corso degli ultimi anni hanno riportato alla luce i numerosi ponti e viadotti fatiscenti presenti in Italia, tuttora aperti alla circolazione. Molti di questi ponti hanno già raggiunto il termine della loro vita utile di 50 anni e necessitano di interventi strutturali urgenti.

Sono numerosi i ponti a rischio crollo nel nostro paese, alcuni dei quali collassati nel corso negli ultimi anni.

Tragici eventi continuano infatti a susseguirsi, spesso con perdite di vite umane, a partire dal collasso del cavalcavia di Annone avvenuto nel 2016 fino al crollo del ponte Aulla del 2020, passando per il crollo del ponte Morandi del 2018.

In particolare, in seguito al crollo del ponte Morandi di Genova è stato emanato il decreto-legge 28 settembre 2018, n. 109.

Il decreto contiene, insieme ad altri provvedimenti, misure relative alla demolizione e ricostruzione del viadotto Polcevera, istituzione dell'Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali (ANSFISA), dell'istituzione dell'archivio informatico nazionale delle opere pubbliche (AINOP).

Fermi i compiti, gli obblighi e le responsabilità degli enti proprietari e dei soggetti gestori in materia di sicurezza, ANSFISA promuove e assicura la vigilanza sulle condizioni di sicurezza del sistema ferroviario nazionale e delle infrastrutture stradali e autostradali <sup>8</sup>.



L' ANSFISA sostituisce la precedente Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle ferrovie (ANSF), istituita ai sensi del Decreto legislativo 10 agosto 2007, e si occupa di verificare l'organizzazione dei processi di manutenzione e dell'attività ispettiva effettuata dai gestori, nonché di eseguire verifiche a campione sulle infrastrutture.

Nonostante l'evidente sforzo del Governo per far fronte alla tragica situazione manutentiva, ANSFISA, a causa di difficoltà dell'ente nel reperire alcuni profili altamente specializzati, a gennaio 2021 risulta ancora non pienamente operativa. All'IOP è associata una struttura di metadati che contiene le informazioni qualificanti dell'opera, quali tipologia e nome dell'infrastruttura, qualificatore dell'infrastruttura, codice identificativo del gestore dell'opera, caratterizzazione geografica e temporale, dati del gestore, del vigilante ecc<sup>9</sup>.

Successivamente, con il Decreto Ministeriale n. 430 8/10/2019, dal 21/11/2019 è esecutivo il DM n. 430 che obbliga le amministrazioni ad eseguire il censimento di tutte le strutture inserendole in AINOP.

### **1.2.1 Cavalcavia di Annone**

Il crollo del cavalcavia sulla provinciale 49 Molteno – Oggiono, verificatosi il 28 ottobre del 2016 alle 17.20, fu causato dal transito di un veicolo eccezionale che trasportava coils di ferro e coinvolse anche alcune automobili, con la tragica conseguenza del decesso di una persona alla guida di un'auto schiacciata dal crollo.

La causa del crollo è da ricondursi principalmente al transito di un trasporto eccezionale del peso complessivo di circa 108 tonnellate sul cavalcavia, dove non potevano transitare mezzi dal peso superiore alle 44 tonnellate.

È importante sottolineare che il peso complessivo della campata centrale del cavalcavia, completo di sicurvia, pavimentazione, cordoli, traversi, soletta in c.a., travi e coppelle è risultato pari a 172.3 tonnellate, superiore al carico di 155 tonnellate assunto dal progettista dell'opera.

Il ponte fu progettato in accordo con quanto prescritto dalla Circolare del 14 febbraio 1962 n.384 come ponte di II categoria. Dallo schema di carico si ha un carico nominale variabile di 55 tonnellate sulla singola corsia.

Lo schema di carico previsto dalla norma in vigore all'atto del crollo, ovvero la NTC 2008, per un ponte di II categoria porta un carico variabile massimo agente di 92 tonnellate sull'intera corsia larga 3.2 metri, comprensivo degli effetti dinamici, mentre quello complessivo agente sulla campata centrale del viadotto risulta pari a circa 150 tonnellate.

È stato rilevato che nella sola giornata del crollo del viadotto sono verosimilmente transitati sul viadotto quattro convogli con peso netto del solo carico superiore alle 70 tonnellate. Tali carichi eccezionali che attraversavano il ponte

imponivano al giunto più esterno un carico prossimo al suo carico di rottura. La fessura a taglio propagatasi nella sella Gerber ha quindi portato al collasso della stessa, come mostrato in figura 1.2.



Figura 1.2: Dettaglio a collasso avvenuto della campata centrale del cavalcavia di Annone <sup>10</sup>.

Le autorizzazioni al transito degli autoarticolati venivano rilasciate sia dalla Provincia di Bergamo sia da quella di Lecco senza alcun controllo né tracciamento dei percorsi.

Ciò nonostante, è la Provincia di Lecco che in qualità di ente gestore della viabilità avrebbe dovuto apporre un cartello di divieto di transito ai mezzi aventi massa complessiva a pieno carico superiore a 44 tonnellate <sup>10</sup>.

Inoltre, a crollo avvenuto è emerso che la Provincia di Lecco riteneva erroneamente che la proprietà del cavalcavia fosse di Anas. Sarebbe dovuto avvenire un passaggio di proprietà fra i due enti, ma soltanto una volta effettuato un intervento di innalzamento del ponte, che di fatto non è mai stato portato a termine.

### **1.2.2 Cavalcavia sull'Adriatica**

Il 9 marzo 2017 crolla un ponte vicino ad Ancona, nel tratto dell'autostrada A14 Adriatica nelle Marche, schiacciando un'auto di passaggio al di sotto del ponte. In seguito ai recenti lavori di ampliamento dell'autostrada da due a tre corsie, l'altezza libera era stata ridotta ed era quindi necessario ripristinare l'altezza regolamentare <sup>11</sup>.

L'incidente si verifica una volta completate le attività di sollevamento del cavalcavia, eseguite mediante dei martinetti, mentre il personale stava realizzando attività accessorie a causa del cedimento delle pile provvisorie.

Dalla perizia tecnica realizzata per conoscere le cause che hanno portato al collasso del cavalcavia, emerge l'assenza di un progetto specifico per il sollevamento di 34 cm dell'impalcato, trattato alla maniera dei ponti con asse retto pur avendo caratteristiche differenti.

La causa del crollo si riconduce alla sottovalutazione, sia in fase di progetto che in quella esecutiva, del possibile movimento di rotazione attorno all'asse verticale passante per il baricentro dell' impalcato obliquo durante le operazioni di movimentazione. La progressiva rotazione ha raggiunto all'ultimo sollevamento un valore tale per cui non era più soddisfatta la condizione di equilibrio e il ponte è sfuggito ai collari posti attorno ai pistoni dei martinetti <sup>12</sup> . In figura 1.3 è mostrata la campata del cavalcavia collassata.



Figura 1.3: Dettaglio a collasso avvenuto della campata centrale del cavalcavia dell'autostrada A14 sull'adriatica<sup>12</sup> .

### **1.2.3 Viadotto della tangenziale di Fossano**

Il 18 aprile 2017 si verifica il collasso della campata dell'asta di svincolo per Marene al km 61.300 in località Fossano, in provincia di Cuneo, la cui realizzazione risale agli anni '90. Il crollo del viadotto è avvenuto a causa del solo peso proprio, in assenza di mezzi transitanti.

Altro aspetto da considerare è l'assenza di sintomi precedenti al crollo: la campata è stata caratterizzata da una rottura di tipo fragile, senza che vi sia stata

una eccessiva deformazione premonitrice. Ad oggi non sono state ancora definite con precisione le cause del crollo<sup>13</sup>, il cui dettaglio è mostrato in figura 1.4.



Figura 1.4: Dettaglio a collasso avvenuto del viadotto della tangenziale Fossano in provincia di Cuneo<sup>13</sup>.

#### **1.2.4 Ponte Morandi**

Il 14 agosto 2018 crolla il ponte Morandi a Genova, causando la morte di 43 persone. All'avvio dell'inchiesta sul crollo del ponte Morandi, quattro periti ingegneri sono stati incaricati dalla procura di Genova per stabilirne le cause. Nelle due perizie, rese pubbliche negli scorsi anni, considerano il fenomeno di corrosione a cui è stata soggetta la parte sommitale del tirante della pila numero 9 come causa principale del crollo.

La prima perizia sullo stato di conservazione del ponte è stata resa pubblica il 1° agosto 2019. In essa si parla di "difetti esecutivi" rispetto al progetto originario e degrado e corrosione di diverse parti della struttura, dovuti alla "mancanza di interventi di manutenzione significativi".

Nelle settantadue pagine di relazione sono emersi dati piuttosto precisi: il 19% dei cavi di acciaio completamente corrosi, il 22% con riduzione di sezione del 75%, il 27% con riduzione del 50% e il restante 18% con riduzione di sezione del 25%. Inoltre, sono stati individuati alcuni difetti di esecuzione, tra cui un'iniezione parziale delle guaine tale da permettere un'estrazione anche manuale dei trefoli in esse contenuti, e l'assenza di alcuni trefoli, i quali non sono stati trovati dentro le guaine. I periti scrivono che sulla pila 9 l'ultimo intervento di manutenzione sotto il profilo strutturale risale al 1993 e che, comunque, nella vita dell'opera non sono stati eseguiti interventi di manutenzione che potessero arrestare il processo



di degrado in atto o di riparazione dei difetti presenti nelle estremità dei tiranti che, sulla sommità del tirante Sud-lato Genova, erano particolarmente gravi <sup>14</sup> . Il primo incidente probatorio, concluso ad agosto 2019, ha quindi evidenziato uno stato diffuso di corrosione dei cavi d'acciaio degli stralli che collegavano la piattaforma stradale alla sommità della pila numero 9 del ponte. Secondo i periti, la causa scatenante del crollo è, in conclusione, il grave fenomeno di corrosione che ha avuto luogo in zone di cavità e mancata iniezione formatesi nella costruzione del ponte nella zona di attacco del tirante con l'antenna.

All'origine di tutto, però, i periti scrivono di aver individuato anche carenze progettuali, di costruzione e di collaudo. Nel progetto non era stato tenuto conto in modo adeguato dei particolari costruttivi, con riferimento alla difficoltà di eseguire i getti in presenza di interferri molto ridotti e alla mancanza di specifiche tecniche adeguate sulle guaine dei cavi e sulle modalità di iniezione, carenze dei controlli in fase di costruzione da parte della direzione dei lavori e della commissione di collaudo in corso d'opera <sup>15</sup> .

A dicembre 2020 viene consegnata la perizia conclusiva sulle cause del crollo del ponte Morandi, nell'ambito del secondo incidente probatorio, iniziato a febbraio 2021. Nel documento, di 467 pagine, vengono in sostanza confermate le cause del crollo definite nella prima perizia.

### **1.2.5 Viadotto lungo la Torino-Savona**

Il 24 novembre 2019 cede un tratto dell'autostrada A6 lungo la Torino-Savona a causa di una frana proveniente della località Madonna del Monte. Non ci sono né vittime, né feriti. La frana ha travolto i pilastri del viadotto portando via una porzione di campata di una carreggiata, fermatasi sotto i piloni dell'altra carreggiata <sup>16</sup> . Il nuovo viadotto, inaugurato nel 21 febbraio 2020, è poi stato temporaneamente chiuso in via precauzionale a causa del movimento del fronte della stessa frana che tre mesi prima aveva distrutto la carreggiata nord.

### **1.2.6 Ponte di Aulla di Caprigliola**

Il ponte di Aulla di Caprigliola, localizzato sulla strada provinciale 70, attraversa il fiume Magra nella località di Albiano Magra, collegandosi alla strada statale 62. La costruzione del ponte in cemento armato risale al 1908, gestito per anni dalla provincia di Massa Carrara e dal 2018 passato in gestione ad Anas. In data 3 novembre 2019 era stata segnalata una lunga crepa sull'asfalto del viadotto in questione. Dopo un sopralluogo dei tecnici dell'Anas, si era proceduto al risanamento della crepa con conglomerato a freddo per ripristinare il piano viabile.

Sempre secondo le stesse fonti, nella giornata del 3 novembre dello stesso anno Anas avrebbe provveduto ad eseguire un'ispezione del ponte di Albiano Magra, non riscontrando anomalie o difetti tali da assumere provvedimenti emergenziali. In data 9 agosto 2019, dopo una richiesta di controllo del ponte da parte delle amministrazioni interessate dal tratto di strada provinciale in cui insiste il viadotto, Anas avrebbe inviato una lettera al Comune di Aulla e alla provincia di Massa Carrara, specificando che il viadotto "Non presenta al momento criticità tali da compromettere la sua funzionalità statica: sulla base di ciò non sono giustificati provvedimenti emergenziali per il viadotto stesso" <sup>17</sup> .



Figura 1.5: Dettaglio a collasso avvenuto del ponte Aulla di Caprigliola situato sulla ex strada provinciale 70, in provincia di Massa Carrara <sup>18</sup> .

Il crollo si verifica il giorno 8 aprile 2020, per la sua intera lunghezza di 330 metri, interrompendo la viabilità sul tratto di collegamento tra le province di Massa Carrara e La Spezia. A seguito del crollo, la procura di Massa Carrara ha aperto un'inchiesta. Tra le cause del crollo rientra sicuramente il sovraccarico apportato dalla soletta, costruita negli anni 90 per creare marciapiedi laterali, che si è andata a sovrapporre ai carichi già esistenti. Il sovraccarico dato dalla soletta e dal relativo sottofondo potrebbe aver eroso gran parte del margine di sicurezza imposto all'epoca della progettazione <sup>18</sup> .

La seconda circostanza è il movimento progressivo che ha interessato la spalla sul lato Liguria, dovuto alla spinta di una frana sul lato Caprigliola.

Il collasso progressivo delle altre quattro campate è spiegato dalla struttura del ponte stesso, composto da archi che premono sulla stessa pila: nel momento in cui uno di essi non esercita più contrasto con la struttura adiacente, si innesca un effetto domino <sup>19</sup> . Sono tuttora assenti valutazioni certe circa la causa del crollo.



### 1.3 Quadro Normativo italiano

Nella normativa italiana sono numerosi i decreti ministeriali e le circolari relativi ai ponti e alla loro manutenzione. Di seguito si elencano i più rilevanti:

- Circolare Ministero dei Lavori Pubblici 19 Luglio 1967 n. 6736/61A1 [4]: La circolare nasce a seguito di un tragico evento: il crollo del ponte di Ariccia del gennaio 1967. Essa impone compiti molto impegnativi agli enti gestori: obbligo di ispezioni visive ogni 3 mesi per tutti i ponti della rete stradale, con un'ispezione più approfondita ogni anno, eseguite da ingegneri <sup>21</sup>. La norma fornisce alcune indicazioni operative, tra cui: frequenza e tipo di ispezioni, individuazione di competenze e responsabilità, qualifica degli ispettori. La circolare, oltre ad illustrarne le modalità, definisce l'obbligo di produrre una documentazione sulle ispezioni. In particolare, prevede la compilazione di un rapporto d'ispezione e di una scheda con i dati del manufatto e delle sue caratteristiche principali <sup>22</sup>. La norma, nonostante l'età, costituisce tuttora una norma vigente, non essendo state adottate norme sostitutive in merito alla periodicità dei controlli. È attualmente una delle più restrittive al mondo e ad essa si riferiscono ancora oggi tutti i manuali di manutenzione e ispezione dei vari gestori stradali in Italia <sup>23</sup>.
- Circolare Ministero dei Lavori Pubblici 25 Febbraio 1991 N. 34233 [5]: Tale circolare, avente il titolo "Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali", tratta le problematiche inerenti la manutenzione e la gestione delle opere d'arte stradali. Nella Circolare del 1991 vengono riprese le medesime questioni della Circolare del 1967, inquadrandosi come semplice evoluzione di quest'ultima. Ad esempio, in un capitolo dedicato alla gestione dei ponti stradali esistenti, vengono definite le attività demandate agli enti gestori, ovvero: vigilanza, ispezione, manutenzione e interventi statici (restauro, adeguamento e ristrutturazione). In particolare, l'articolo 9.3 della circolare afferma: "Gli Uffici Tecnici delle Amministrazioni proprietarie delle strade, o alle quali la gestione delle strade è affidata, devono predisporre un sistematico controllo delle condizioni statiche e di buona conservazione dei ponti. La frequenza delle ispezioni deve essere commisurata alle caratteristiche ed alla importanza dell'opera, nonché alle risultanze della vigilanza".
- Decreto Legislativo N. 285 del 30/04/1992 [6]: Tale decreto, rilasciato dal Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti ed avente come titolo "nuovo Codice della strada", costituisce punto di riferimento per la definizione dei poteri e compiti degli enti proprietari delle strade. In particolare, nell'articolo 14 si legge " Gli enti proprietari delle strade, allo scopo di



garantire la sicurezza e la fluidità della circolazione, provvedono alla manutenzione, gestione e pulizia delle strade”.

- Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008 e Circolare 2 Febbraio 2009 N. 617/C.S.LL.PP. [7]: Tale norma introduce le prove necessarie per valutare le proprietà meccaniche dei materiali. In particolare, per il calcestruzzo tali prove riguardano l'estrazione di un campione e in seguito una prova di compressione fino a rottura. Per l'acciaio è invece necessario svolgere delle prove di trazione fino a rottura, in modo da determinare la resistenza a snervamento e la resistenza ultima su campioni prelevati direttamente in situ <sup>24</sup>. Vengono qui introdotti i concetti di durabilità definita come “conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera, che deve essere garantita attraverso una opportuna scelta dei materiali e un opportuno dimensionamento delle strutture, comprese le eventuali misure di protezione e manutenzione” e di vita nominale di una struttura definita come “il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata”. Le NTC al capitolo 8 “Costruzioni Esistenti” definiscono le condizioni per la valutazione della sicurezza, riferito in generale a tutte le costruzioni. In particolare, il capitolo 8.5.5 stabilisce che i valori delle azioni da utilizzare nella valutazione della sicurezza su costruzioni esistenti sono quelli definiti dalla norma per le nuove costruzioni.

### **1.3.1 Linee Guida per la sicurezza dei ponti**

L'Assemblea generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, in data 06/05/2020, ha approvato le Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti [8]<sup>25</sup>. Il documento fornisce ai gestori infrastrutturali gli strumenti necessari per valutare lo stato di degrado delle infrastrutture e per pianificare al meglio le attività di sorveglianza e monitoraggio necessarie. L'approccio, organizzato su più livelli, prevede una valutazione speditiva dello stato dell'opera nei suoi livelli più bassi e valutazioni accurate nei livelli più alti, da attuarsi solo su un numero limitato di opere. Le ispezioni visive in situ, previste dal livello 1 delle linee guida, sono corredate dalla redazione di schede di rilievo e hanno la finalità di confermare o integrare le informazioni già raccolte nella fase di censimento dell'opera e della relativa scheda di censimento previste dal livello 0 delle linee guida. In particolare, è prevista la compilazione di una scheda descrittiva di ispezione, di una scheda di difettosità al fine di valutare lo stato di conservazione corrente della



struttura e di una scheda di rilievo al fine di indentificare i potenziali rischi associati a fenomeni di frana ed idraulici. L'organizzazione delle attività richiede l'assegnazione di una classe di attenzione (CdA) ad ogni opera, definita sulla base di tre componenti che definiscono il rischio: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione della struttura. Si tratta di un'analisi multi-rischio, in quanto l'attribuzione della CdA dell'opera si basa sulla valutazione di quattro tipologie di rischio: strutturale e fondazionale, sismico, frane ed idraulico. Queste ultime sono analizzate separatamente e le loro conseguenze vengono ricomposte alla fine. Quindi, nel livello 2 delle Linee Guida, le tre componenti che definiscono il rischio sono stimate quantitativamente e tali stime quantitative sono attribuite alle classi bassa, medio-bassa, media, medio-alta e alta, le quali definiscono la classe di attenzione dell'opera. Infine, gli ultimi tre livelli delle linee guida consistono in valutazioni preliminari e accurate della sicurezza dell'opera ed una valutazione della resilienza della rete.

Le attività da intraprendere sull'opera, quali valutazioni preliminari e accurate della sicurezza, programmazione degli interventi manutentivi, installazione di sistemi di monitoraggio, esecuzione di ispezioni straordinarie, sono conseguenti alla classe di attenzione risultante. Inoltre, nota la classe di attenzione di tutte le opere di propria competenza, il gestore stradale è in grado di stabilire un ordine di priorità per le attività di sorveglianza e monitoraggio necessarie nella propria rete, anche in base ai fondi disponibili.

## 1.4 Le problematiche emerse dalla gestione dei ponti in Italia

Nell'ultimo secolo i ponti sono stati progettati facendo uso di carichi di progetto progressivamente crescenti, imposti dalle diverse normative per tenere conto del crescente volume di traffico e peso dei mezzi di trasporto.

Ciò nonostante, non sono mai stati chiariti i procedimenti da adottare su opere che hanno superato la vita attesa, utilizzata come riferimento nella progettazione, né definita una coerente politica di adeguamento delle infrastrutture esistenti[9]. Quando le condizioni dell'opera sono tali da rendere il livello di sicurezza inadeguato, occorre procedere modifica della destinazione d'uso, ad un adeguamento oppure abbattere e ricostruire l'infrastruttura in esame. Tale scelta è spesso operata sotto la pressione di situazioni economiche critiche e in assenza di un consenso tecnico-scientifico ampio sulla procedura da adottare<sup>20</sup>. Inoltre, l'imposizione delle NTC di verificare le strutture esistenti mediante normativa vigente, e quindi carichi di progetto, risulta eccessivamente conservativa. Ad esempio, la normativa Americana e Britannica ammettono nelle verifiche di sicurezza l'utilizzo di carichi veicolari pari ai massimi legalmente ammessi e di modelli di carico determinati a partire da misurazioni dirette.



## **1.5 Sistemi di gestione dei ponti nel mondo**

La gestione dei ponti comprende tutte le attività che interessano il ponte lungo la sua intera vita utile, dalla sua progettazione e costruzione fino alla sua manutenzione. Tale gestione ha la finalità di garantire la funzionalità e la sicurezza dell'opera stessa. In Italia, le normative correnti, in materia di costruzioni esistenti, definiscono in maniera precisa i parametri necessari per attività di tipo manutentivo sui ponti. Ciò nonostante, non sempre vengono rispettate degli enti gestori. Le cause sono da ricercarsi sia nell'insufficienza dei fondi necessari all'esecuzione di tutti gli interventi necessari, sia nell'assenza di un efficace strumento di gestione, dato l'elevato numero di ponti e viadotti sottoposti alla gestione di ogni specifico ente. Per garantire la funzionalità e la sicurezza dell'opera è necessaria una corretta pianificazione delle ispezioni e degli interventi, verifiche periodiche della struttura e dei rischi a cui è sottoposta ed interventi di manutenzione adeguati. A tal fine risulta necessaria la disponibilità ed accessibilità, agli enti gestori, di tutte le informazioni utili delle strutture gestite. Negli ultimi anni, a partire dall'avvento del personal computer, in tutto il mondo i sistemi di archiviazione manuali sono stati progressivamente sostituiti da sistemi informatizzati. La rapida consultazione ed archiviazione dei dati delle infrastrutture, resa possibile dai sistemi software di gestione dei ponti, permette una migliore gestione e pianificazione delle attività da parte degli enti gestori. I Bridge Management System (BMS) non soltanto racchiudono informazioni e documenti sulle infrastrutture ma presentano una serie di strumenti ed algoritmi in grado di supportare gli enti gestori delle infrastrutture nelle fasi decisionali, sia di ispezione, manutenzione che di prioritizzazione delle attività. I software BMS più recenti sono in grado di definire il programma di manutenzione più adeguato per ogni opera e definire un ordine di prioritizzazione delle attività. Tutte le valutazioni sono effettuate sulla base di aspetti tecnico-economici, tra cui normativa vigente, budget disponibile, condizione corrente dell'infrastruttura e algoritmi integrati di previsione del degrado.



### 1.5.1 Livelli di pianificazione dei Bridge Management System

L'obiettivo di un BMS è trovare la strategia ottimale che garantisca un adeguato livello di sicurezza al più basso costo, per l'intero ciclo di vita di ogni struttura gestita. In ogni BMS è possibile individuare due livelli differenti di pianificazione delle attività: *Network level* e *Project Level* [10]:

- **Network Level:** Consiste nella pianificazione ottimale della manutenzione del ponte a livello di rete, basata principalmente su considerazioni di tipo politico ed economico. Consente di ricavare le condizioni ideali per l'intero insieme di ponti gestito dal software, a partire da un'analisi di costi e benefici. Permette di stabilire una priorità di intervento, attraverso un confronto delle opere che costituiscono la rete, sulla base delle loro condizioni e della loro importanza all'interno della rete.
- **Project Level:** Consiste nella pianificazione ottimale della manutenzione a livello della singola opera, isolata dal contesto viario in cui è inserito. Si valuta la condizione della singola opera sulla base di una serie di parametri, al fine di stabilire la necessità di eseguire interventi o l'avvio di indagini approfondite. La gestione ottimale delle singole opere viene valutata sulla base della pianificazione a livello di rete.

I due livelli di gestione appena elencati sono in stretta correlazione tra loro e consentono di stabilire la priorità di esecuzione delle attività, tenendo conto sia della condizione della singola opera, che della sua importanza rispetto alla rete stradale. I più recenti software BMS includono algoritmi in grado combinare assieme i due livelli decisionali, nonostante una loro piena integrazione risulti complessa.

### 1.5.2 Struttura dei Bridge Management System

Ogni BMS è generalmente composto dai seguenti componenti di base:

- **Archiviazione dati:** In generale, le informazioni contenute nei database di software BMS sono organizzate in diversi moduli. In particolare, nel primo modulo dell'archivio vengono archiviate tutte le informazioni che risultano pressoché invariate nel corso della vita della struttura. Tale modulo include l'identificazione del ponte, la sua localizzazione geografica, aspetti amministrativi, informazioni su progetto, costruzione e sugli interventi passati, tipologia strutturale e geometria. In un secondo modulo sono raccolte informazioni e documentazione fotografica



provenienti da attività di ispezione, manutenzione ed analisi strutturale. L'efficienza del software BMS dipende dalla qualità e accuratezza delle informazioni dell'inventario. Generalmente solo una piccola parte delle informazioni di inventario viene resa accessibile al pubblico, mentre la restante parte è accessibile solo dal personale autorizzato. Ogni paese possiede il proprio archivio. Ad esempio, in Italia è stato recentemente istituito l'archivio nazionale AINOP, mentre in America è presente il National Bridge Inventory (NBI).

- **Modelli di Degrado:** Durante la sua vita utile, il ponte è soggetto a fenomeni di degrado, dovuti al suo normale esercizio, che possono essere quantificati attraverso indicatori numerici dello stato di condizione. Gli indici dello stato di condizione forniscono la condizione dell'opera in un certo istante, mentre modelli di degrado rappresentano l'andamento nel tempo di tali indici. Oltre a consentire la previsione dell'evoluzione del degrado stesso, possono essere utilizzati per la pianificazione degli interventi di manutenzione. È possibile definire un modello di degrado sia per l'opera completa che per i singoli elementi, in quanto ogni elemento possiede una propria velocità di deterioramento. I modelli di deterioramento più diffusi nei software BMS sono quelli di tipo stocastico, in particolare il modello a catena di Markow.
- **Modelli di costo:** L'analisi economica, definita *life-cycle cost analysis* (LCCA), è uno dei criteri decisionali utilizzati dai software BMS. Essa include generalmente tutti i costi necessari per la gestione del ponte, quali progettazione, costruzione, manutenzione e demolizione. In tale modulo vengono analizzate diverse alternative di manutenzione dell'opera, per poi calcolarne costi e durata al fine di scegliere quella ottimale. In definitiva, la LCCA consente di identificare l'uso più efficace del budget destinato alla manutenzione della rete dal gestore infrastrutturale. Generalmente la LCC assume una formulazione di questo tipo[11]:

$$LCC = C_0 + C_I + C_M + C_R + C_F$$

In cui  $C_0$  è il costo di ricostruzione,  $C_I$  costo di ispezione,  $C_M$  costo di manutenzione,  $C_R$  costo di riparazione e  $C_F$  costo di collasso.

- **Modelli di analisi e di ottimizzazione:** Consentono di definire le priorità di intervento sulle opere d'arte facenti parte la rete. Generalmente tale decisione viene presa a livello della rete, mentre a livello di progetto vengono scelti i metodi di riparazione di ogni ponte. La fase decisionale deve basarsi sia su valutazioni a livello di rete che a livello del singolo ponte in quanto trattare separatamente il livello di rete e di progetto può

portare a decisioni non ottimali[12]. Le Linee Guida per la sicurezza dei ponti rappresentano un esempio di integrazione dei due livelli.

- **Funzioni di aggiornamento:** Consentono di gestire dal punto di vista temporali le decisioni prese all'interno della programmazione.

In figura 1.6 sono schematizzati i componenti di base di un software BMS e la loro interazione, secondo la American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO)[13].

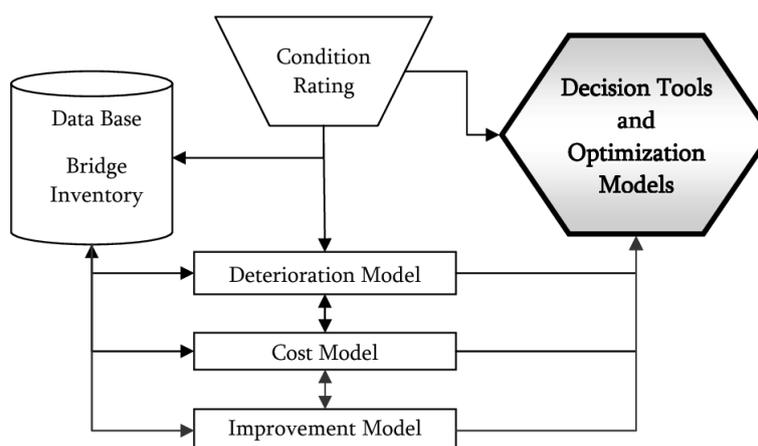


Fig. 1.6 – Componenti di base di un BMS secondo AASHTO[13].

### 1.5.3 Bridge Management System esistenti

A livello nazionale ed internazionale esistono numerosi software BMS, alcuni dei quali sono disponibili commercialmente mentre altri vengono sviluppati ed utilizzati internamente ai gestori di grandi reti. Vengono di seguito elencati i software BMS più famosi presenti sul mercato:

- **AASHTOWare Bridge Management:** AASHTOWare Bridge Management, chiamato anche Pontis, è un sistema di gestione dei ponti entrato in commercio nel 1992 negli USA e attualmente adottato da più di cinquanta suoi stati. È stato realizzato in collaborazione con la Federal Highway Administration (FHWA) ed incorpora il database del National Bridge Inventory (NBI). Rappresenta uno dei BMS più avanzati presenti oggi in commercio. Il software utilizza i modelli di deterioramento di *Markov* e quello di *Weibull* per la fase di ottimizzazione. La strategia di ottimizzazione di Pontis prevede una definizione degli obiettivi al *Network Level*, utilizzata per azioni a livello del singolo ponte.
- **Bridgit:** Viene sviluppato sotto il *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) per soddisfare le richieste di stato ed enti locali. *Bridgit*



soddisfa i requisiti imposti dalla FHWA in America per i software BMS. La strategia di ottimizzazione di *Bridgit* si basa su decisioni prese al *project Level*, utilizzate per azioni a livello della rete. *Bridgit*, analogamente a *Pontis*, utilizza modelli di deterioramento a catene di Markov.

- **BridgeStation:** Viene utilizzato in Inghilterra e fa uso di uno specifico documento, il *Guidance Document for Performance Measurement of Highway Structures*, per il calcolo degli indici di degrado dei ponti.
- **PROPonti:** rappresenta una trasposizione italiana del software *Pontis* Americano. È il primo software italiano ad integrare i livelli di analisi 0,1 e 2 imposti dalle Linee Guida sui Ponti. La versione internazionale di PROPonti si basa sulle linee guida definite per l'Highways Agency in Inghilterra, riportate nel documento *Guidance Document for Performance measurement of Highway Structures*.

In Italia sono stati sviluppati numerosi software BMS, utilizzati internamente dai gestori di grandi reti. Ne sono un esempio Anas S.p.a e la Provincia Autonoma di Trento. La Provincia Autonoma di Trento, in collaborazione con l'università degli studi di Trento, utilizza a partire dal 2004 un software BMS sviluppato internamente.



## Sitografia del capitolo

1. <https://www.kireti.it/competenza-della-rete-stradale-quant-sono-i-ponti-in-italia-e-chi-deve-occuparsene/>
2. <https://www.ingenio-web.it/25035-ponti-italiani-la-parola-ai-gestori-delle-reti-stradali>
3. <https://www.corriere.it/dataroom-milena-gabanelli/ponti-viadotti-pericolosi-anas-3500-ponti-fuori-controllo-763-senza-proprietari/b79e6a4c-3ac7-11ea-9d89-0cf44350b722-va.shtml>
4. [http://documenti.camera.it/leg18/dossier/pdf/Am0054.pdf?\\_1564497985932](http://documenti.camera.it/leg18/dossier/pdf/Am0054.pdf?_1564497985932)
5. <https://www.stradeanas.it/it/cavalcavia-senza-documentazione-di-proprietari>
6. <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/rientro-strade>
7. <https://www.ingegneri.cc/ponti-senza-proprietari.html/>
8. <https://www.ansf.gov.it/ansfisa>
9. <https://ainop.mit.gov.it/portale#/>
10. <https://www.ilgiorno.it/lecco/cronaca/crollo-ponte-annone-1.5949578>
11. <https://www.ilpost.it/2017/03/10/cavalcavia-crollato-cosa-sappiamo/>
12. [https://www.corriereadriatico.it/ancona/errori\\_in\\_serie\\_sul\\_ponte\\_killer\\_crollo\\_dovuto\\_alla\\_rotazione-4207493.html](https://www.corriereadriatico.it/ancona/errori_in_serie_sul_ponte_killer_crollo_dovuto_alla_rotazione-4207493.html)
13. <https://www.teknoring.com/news/ingegneria-strutturale/viadotto-crollato-a-fossano-le-ipotesi-preliminari-degli-ingegneri-cuneesi/>
14. <https://www.genova24.it/2020/12/ponte-morandi-crollo-per-la-corrosione-del-tirante-con-manutenzioni-non-sarebbe-successo-247912/>
15. <https://www.ilpost.it/2020/12/22/ponte-morandi-perizia-crollo/>
16. <https://www.ilfattoquotidiano.it/2019/11/24/liguria-crolla-una-corsia-di-un-viadotto-su-autostrada-a6-nel-savonese-direzione-torino-nessun-veicolo-coinvolto-toti-frana-ha-falciato-pilastri/5578031/>



17. Legislatura 18 Atto di Sindacato Ispettivo n° 3-01509 pubblicato il 21 aprile 2020, nella seduta n. 208
18. <https://www.voceapuana.com/politica/2020/05/06/de-micheli-due-le-cause-possibili-del-crollo-del-ponte-di-caprigliola/27924/>
19. <https://www.formulapassion.it/automoto/mobility/crollo-ponte-aulla-ricostruzione-progetti-cause-fiume-magra-494015.html#:~:text=Per%20quanto%20riguarda%20invece%20le,progr%20essivo%20che%20ha%20interessato%20la>
20. <https://www.ingenio-web.it/24090-le-cause-tecniche-del-crollo-del-cavalcavia-di-annone>
21. <https://www.ingenio-web.it/25035-ponti-italiani-la-parola-ai-gestori-delle-reti-stradali>
22. <https://123dok.org/document/nq76lkvy-sistema-supporto-decisioni-gestione-manutenzione-ponti-rete-viaria.html>
23. <https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=gestione-ponti-pefano.pdf>
24. <https://webthesis.biblio.polito.it/11849/1/tesi.pdf><https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/mit-approvate-le-linee-guida-per-la-sicurezza-dei-ponti>



## Capitolo 2

# Metodologie di Ispezione dei Ponti

In questo capitolo verranno analizzate le tipologie di ispezioni visive di ponti esistenti in Italia e nel mondo e le modalità con cui esse avvengono, evidenziando nello specifico il livello di dettaglio che le caratterizza. Successivamente verranno descritti i vantaggi dell'integrazione di droni in fase di ispezione visiva e come supporto ai processi di gestione e manutenzione dei ponti esistenti. In particolare, verrà indagata la possibilità di ottenere modelli tridimensionali in scala delle strutture ispezionate mediante rilievo fotogrammetrico eseguito da drone. A tal fine verrà fatta una rassegna delle principali metodologie esistenti per il rilievo e la restituzione di modelli tridimensionali di oggetti. Infine, verrà eseguito operativamente il rilievo di un complesso di edifici tramite drone, mirato ad ottenere un modello ispezionabile delle strutture indagate.

### 2.1 Ispezioni tradizionali

Le ispezioni visive rappresentano la componente principale di un qualsiasi programma di manutenzione di opere d'arte. La frequenza e tipologia di ispezioni visive a cui sono sottoposti i ponti esistenti possono variare anche considerevolmente nei vari paesi del mondo. Esse dipendono spesso dalle particolari caratteristiche del ponte o dai risultati ottenuti dalle ispezioni precedenti. Possono determinare l'avvio di indagini approfondite, chiusura temporanea della viabilità o l'avvio di operazioni di manutenzione.

Le ispezioni tradizionali possono richiedere in alcuni casi veicoli con bracci meccanici (EWP - elevating work platform), l'utilizzo di corde e quindi di personale addestrato oppure in altri casi l'ispezione dell'interno di elementi come pile e impalcati da ponte.

Un esempio di ispezione tradizione di ponti è mostrato in figura 2.1.



Fig. 2.1 – Ispezione dell’impalcato eseguita mediante veicolo con braccio meccanico<sup>1</sup>.

### 2.1.1 Ispezioni visive negli Stati Uniti d’America

Negli Stati Uniti esistono sette diverse tipologie di ispezioni di ponti, descritte nel manuale AASHTO Manual for Bridge Evaluation [14], in accordo con la *Federal Highway Administration* [15]. La tabella 2.1 ne mostra una descrizione sommaria.

Tab. 2.1 - Tipologie di ispezioni di ponti negli USA [16].

Inspection	Description
Initial	First inspection of a bridge as it becomes a part of the bridge inventory to determine baseline structural conditions.
Routine	Regularly scheduled inspection consisting of observations and/or measurements needed to determine the physical and function condition of the bridge.
Damage	Unscheduled inspection to assess structural damage resulting from environmental factors or human actions.
In-Depth	A close-up inspection which investigates deficiencies that were not detected during Routine Inspection.
Special	An inspection scheduled at the discretion of the bridge owner, used to monitor a particular known defect or suspected deficiency.
Underwater	Inspection of the underwater portion of a bridge substructure and the surrounding channel.
Fracture-Critical Member	A hands-on inspection of a fracture-critical member or components that may include visual and other non-destructive evaluation.

NDT: Non-destructive Test



In particolare:

- **Initial Inspection:** Per i ponti di nuova realizzazione è imposta un'ispezione iniziale, che deve avvenire dopo la costruzione ma prima dell'apertura al traffico, e la comunicazione dei risultati all'archivio dati NBI Americano. Tale ispezione va effettuata anche quando c'è un cambio della configurazione della struttura, come ad esempio un ampliamento della carreggiata o altri interventi migliorativi. L'ispezione ha la finalità di individuare qualsiasi problema esistente e le parti della struttura in cui potrebbero presentarsi problemi in futuro. Questa deve essere seguita da una determinazione analitica della capacità di carico del ponte, completata entro e non oltre 3 mesi dopo l'ispezione iniziale.
- **Routine Inspection:** Viene condotta dall'impalcato, dal livello del suolo e da piattaforme di lavoro permanenti e passerelle, se presenti. Può prevedere l'uso di equipaggiamenti speciali per l'ispezione dell'intradosso dell'impalcato. L'ispezione deve tenere conto delle aree individuate dalle ispezioni precedenti. Se durante l'ispezione viene stabilita la necessità di indagini ulteriori, occorre pianificare una ispezione In-Depth.
- **Damage Inspection:** Permette di stabilire la necessità di limitazioni di traffico di emergenza o la chiusura al traffico e valutare un eventuale intervento di riparazione. L'onere ispettivo e le conseguenti determinazioni, misure e verifiche necessarie, possono variare enormemente in base all'estensione del danno rilevato.
- **In-Depth Inspection:** Consiste in un'analisi ravvicinata di uno o più elementi del ponte per identificare difetti non riconoscibili dalle altre metodologie ispettive. Possono essere eseguite come approfondimento delle *Damage* o *Initial Inspections* oppure possono essere programmate ad intervalli prestabiliti ed indipendenti dalle altre tipologie di ispezioni. Possono richiedere una limitazione del traffico ed equipaggiamento specifico per ispezionare ad esempio canale ed impalcato. Possono essere svolti test non distruttivi in sito e test sui materiali al fine di valutare la capacità di carico del ponte.
- **Francture-Critical Inspection:** Riguardano l'ispezione di ponti in acciaio e la determinazione degli elementi critici a frattura (*fracture critical members*). Per elementi in cui la durezza a frattura non è nota, possono essere eseguiti test per determinare il rischio di frattura fragile a basse temperature.



- **Underwater inspection:** Riguardano l'analisi del canale e della porzione sommersa della sottostruttura. La prima deve essere eseguita entro sei mesi dall'apertura del ponte.
- **Special Inspection:** Viene utilizzata per monitorare un difetto noto o sospetto del ponte. Devono essere fornite delle linee guida e procedure riguardo l'analisi del difetto. La loro programmazione avviene a discrezione dell'ente gestore o proprietario. In base alla severità del difetto ne viene stabilita la cadenza.

La frequenza minima delle ispezioni è fissata a due anni, con ispezioni speciali escluse dal conteggio, e può essere estesa qualora si presentino determinate condizioni. In particolare, rapporti passati e cronologia e analisi delle prestazioni possono portare ad un'estensione della frequenza minima ai 48 mesi. Ad esempio, tale estensione è consentita qualora si verificano le seguenti condizioni:

1. I componenti del ponte hanno un rating uguale o superiore a 7 su 10.
2. il ponte ha un'altezza libera verticale maggiore o uguale di 16 pollici e nessun danneggiamento pregresso di veicoli con altezza superiore ai limiti consentiti.

### 2.1.2 Ispezioni visive in Inghilterra

I requisiti per le ispezioni di ponti autostradali in Inghilterra sono stabiliti dall'autorità *Highway Agency* [17]. L'autorità inglese definisce cinque tipologie di ispezioni per i ponti, che possono essere utilizzate anche in maniera combinata, mostrate in Tabella 2.2.

Tab. 2.2 – Tipologie di ispezioni di ponti in Inghilterra [16].

Inspection	Description
Acceptance	Performed for new bridges, newly repaired bridges, and newly start of a new maintenance contract.
Superficial	Checks for outstanding defects that pose a risk to safety are highlighted and action taken immediately to remedy them.
General	Applies to bridge elements that are easily accessible.
Principal	All bridge elements, including those that are difficult to access. This may sometimes require specialist access machinery or tools.
Special	Detailed investigation of a particular bridge component. Bridges that have been strengthened using plates bonded to them also require special inspections.



In particolare:

- Le ispezioni superficiali sono le tipologie di ispezione che devono essere eseguite con maggiore frequenza. Esse forniscono una stima dello stato di salute degli elementi costituenti il ponte, sulla base dei difetti individuati sulla superficie visibile.
- Le ispezioni generali hanno frequenza minima imposta di due anni<sup>3</sup> e vengono eseguite senza ausilio di equipaggiamenti speciali e senza blocco del traffico. Esse consistono in un esame della struttura in ogni sua parte, spesso eseguita a distanza utilizzando binocoli o rilievi aerei con droni.
- Le ispezioni principali hanno una frequenza minima di sei mesi, imposta dalla Highways Agency, e richiedono un esame a distanza ravvicinata dell'intera struttura. Possono includere tecniche di indagine specialistiche, ispezioni interne della struttura e richiedere un blocco del traffico.
- Le ispezioni speciali vengono eseguite sotto segnalazione effettuata in ispezione generale o principale e riguardano l'analisi dettagliata di una parte della struttura o di un particolare difetto o criticità precedente individuato.

La Highway Agency definisce delle linee guida speciali e specifici regimi di ispezione per strutture ad alto rischio, quali strutture precomprese a cavi post tesi. Inoltre, in fase di progetto di interventi su strutture esistenti o progettazione di nuove strutture, la struttura deve ricevere un'approvazione tecnica indipendente, definita *Category 3 Checks*, da un ente indipendente alla progettazione.



### 2.1.3 Ispezioni visive in Italia

In passato la Circolare n. 6736/61A1 del 1967 [4] rendeva obbligatoria l'esecuzione di ispezioni trimestrali per tutti i ponti della rete stradale italiana. Oggi, con l'avvento delle linee guida sui ponti esistenti, la frequenza minima delle ispezioni è stata aumentata. Sono definite tre diverse tipologie di ispezione:

- **Ispezioni Ordinarie:** Sono spesso definite indagini di livello 1. Possono prevedere l'esecuzione di indagini non distruttive e l'utilizzo di droni. Ogni ispezione visiva, in accordo con le linee guida per i ponti esistenti, richiede la compilazione di una serie di schede, i cui modelli sono presenti nell'allegato B del suddetto documento. Ad esempio, nella scheda di difettosità l'operatore è tenuto a fornire una descrizione dei vari difetti riscontrati durante l'ispezione, spiegando in quale punto si è rilevato il problema e allegando la relativa documentazione fotografica. La frequenza minima delle ispezioni ordinarie viene fissata in base alla CdA di pertinenza e al fatto che le ispezioni periodiche sono precedentemente state eseguite in conformità alla suddetta circolare del 1967. Hanno la finalità di valutare la necessità di eseguire ispezioni straordinarie, indagini di sicurezza oppure di definire gli obiettivi del monitoraggio strumentale, se presente.
- **Ispezioni Straordinarie:** Devono essere eseguite non oltre 60 giorni da quando ne viene resa nota la necessità. Ciò si verifica in seguito ad ispezioni ordinarie che hanno riscontrato criticità come difetti di gravità 5, in seguito ad eventi eccezionali come incidenti rilevanti o frane oppure quando il modello predittivo di degrado o il sistema di monitoraggio evidenziano comportamenti anomali. Possono prevedere l'esecuzione di prove di carico statiche o rilievi della risposta dinamica.
- **Ispezioni Speciali:** Possono essere eseguite contestualmente ad una ispezione straordinaria, rendendole di fatto coincidenti. Riguardano ponti in cemento armato precompresso (c.a.p.) a cavi post-tesi resi aderenti o ponti localizzati in aree in cui fenomeni alluvionali, erosionali e franosi o idrogeologici possono presentarsi sulla struttura. Possono prevedere l'esecuzione di indagini non distruttive o semi-distruttive e hanno la finalità di valutare la necessità di eseguire indagini approfondite di livello 4 o interventi immediati. In caso non evidenzino tali necessità, occorre prevedere un'ispezione di livello 1 per la redazione delle schede di difettosità, se non eseguita contestualmente all'ispezione speciale. L'ispezione speciale eseguita su ponti in c.a.p a cavi post tesi prevede la compilazione di una scheda, il cui modello è contenuto nell'allegato D delle suddette Linee Guida.



L'ispezione subacquea, se necessario, viene eseguita nell'ambito delle ispezioni ordinarie o straordinarie. Essa è obbligatoria a seguito di eventi di piena, anche non eccezionale, dei corsi d'acqua attraversati dal ponte.

Al fine di compilare gli elaborati richiesti in fase di ispezione, risulta necessaria l'acquisizione e catalogazione di un determinato numero di fotografie, rese possibili rispettivamente da camera e supporto cartaceo. Oggi la compilazione di tali schede di difettosità non avviene più in forma cartacea ma mediante utilizzo di supporti informatici, che consentono un'acquisizione istantanea di testo e documentazione fotografica.

## **2.2 Ispezioni con Droni**

Spesso risulta impossibile per il gestore autostradale eseguire le attività ispettive su tutte le infrastrutture di sua competenza. In alcuni casi occorre istituire un blocco temporaneo della circolazione. Inoltre, i danneggiamenti sono spesso localizzati su aree del ponte difficilmente raggiungibili, ad esempio per presenza di vegetazione o corsi d'acqua. Inoltre, alcuni ponti sono realizzati in luoghi pericolosi, come sopra o vicino a un'autostrada o in prossimità dei binari del treno o dirupi.

Questo è il motivo per cui sempre più gestori autostradali sono interessati all'utilizzo di tecniche ispettive alternative per l'ispezioni dei ponti. Per strutture che si sviluppano in altezza, strutture che presentano cavi sospesi e punti della struttura pericolosi o difficilmente accessibili dall'operatore, è possibile prevedere l'utilizzo di droni.

In tali contesti, l'utilizzo di camere montate su droni, chiamati anche *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), può risultare determinante al fine di snellire il processo di ispezione. Infatti, nel corso degli ultimi anni si sta assistendo ad un'integrazione degli UAV all'interno del processo di ispezione ordinaria di ponti e all'interno di indagini visive di qualsivoglia struttura civile e edile.



## 2.3 Tecnologie di restituzione di modelli tridimensionali

La determinazione della posizione e orientamento in tempo reale di un oggetto è definita odometria. L'odometria viene spesso utilizzata per la mappatura di superfici al fine di ricavare nuvole di punti. Esistono diverse metodologie per eseguire tali determinazioni:

- **Odometria Visiva (VO):** Utilizza le immagini acquisite in sequenza da una camera montata su un dispositivo.
- **Odometria Visiva Inerziale(VIO):** Utilizza una camera abbinata ad un sistema inerziale, chiamato *inertial measurement unit* (IMU), montati su un dispositivo.
- **Odometria LiDAR(LO):** Utilizza un Laser scanner montato su un dispositivo.
- **Odometria LiDAR con Normal Distribution Transform(NDTO):** Utilizza un Laser scanner montato su un dispositivo ed un algoritmo NDT per calcolare la trasformazione tra frame di nuvole di punti. La Normal Distribution Transform(NDT) [18] è un algoritmo utilizzato per trovare corrispondenze tra diverse nuvole di punti, appartenenti a diverse scansioni eseguite da Laser Scanner. La NDT trasforma ogni serie di punti appartenenti ad una superficie bidimensionale della scansione in funzioni di densità di probabilità, espresse da una serie di distribuzioni normali. In particolare, ogni superficie 2D è divisa in celle, ad ognuna delle quali è assegnata una distribuzione normale. Si ottiene così una densità di probabilità continua e differenziabile a tratti che consente di abbinare una seconda scansione utilizzando l'algoritmo di Newton. La NDT è spesso utilizzata in algoritmi di *simultaneous localization and map building* (SLAM), i quali consentono di ricostruire la mappa di un ambiente in tempo reale, tenendo traccia della posizione del dispositivo. La metodologia NDT consente la costruzione di modelli tridimensionali in tempo reale anche senza utilizzare i dati dell'odometria. La NDT fornisce risultati migliori, in termini di accuratezza e tempo di esecuzione, se applicata a superfici planari. Sono state proposte diversi approcci migliorativi, tra cui l'applicazione della NDT a nuvole di punti precedentemente proiettate al fine di rendere planari le superfici[19].



### 2.3.1 restituzione di modelli tridimensionali nell'ispezione di ponti

Le tecnologie di acquisizione dati maggiormente utilizzate nell'ispezione di ponti negli ultimi anni sono *UAV-Structure from Motion* e *Terrestrial Laser Scanner*(TLS):

- **UAV-SfM:** Come già accennato, le ispezioni basate su immagini acquisite da remoto, chiamate UAV-SfM, fanno uso solo di una camera digitale e un apparato interno che registra posizione GPS e assetto del velivolo ad ogni fotogramma acquisito. Tale metodologia di rilievo permette di accedere a posizioni difficilmente raggiungibili o coperte da vegetazione. La fotografia ad alta risoluzione può essere integrata, dove necessario, dall'ulteriore precisione fornita dalle nuvole di punti ottenute da scansioni laser (*LiDAR*).
- **TLS:** Le ispezioni che fanno uso di uno o più laser scanner terrestri sono dette *TLS-Based*. Richiedono di essere posizionati su superfici piane e fisse e permettono di ottenere una nuvola di punti, la cui densità è strettamente correlata alla durata dell'acquisizione. I laser scanner richiedono per il loro funzionamento una base piatta e un campo visivo libero da ostacoli, fattori non sempre disponibili. Dato che la posizione è fissa durante la scansione, la presenza di oggetti o vegetazione tra scanner e la struttura possono interferire e in alcuni casi rendere impossibile l'acquisizione di alcune porzioni della struttura. È necessario usare più punti di stazionamento per coprire l'intero ponte.

Le nuvole di punti ottenute con la tecnica UAV-SfM hanno solitamente un livello di rumore più elevato di quelle basate sul TLS e molti punti anomali (*outlier*). Infatti, i tempi di elaborazione software per l'ottenimento di modelli tridimensionali da rilievi UAV-SfM sono spesso più elevati di quelli relativi a tecniche TLS. In particolare, esperimenti condotti sul campo [20] mostrano un'accuratezza sub-metrica della geometria delle superfici rilevate, a seconda della distanza mantenuta dal drone dalla superficie mappata. Invece, l'accuratezza del TLS nella rilevazione sul campo è dell'ordine del centimetro, al fronte di un'accuratezza teorica del millimetro. Ad esempio, nello studio [20] è stato calcolato il volume di materiale mancante sulla struttura facendo uso dei modelli tridimensionali ricavati dal rilievo con UAV e TLS.



In tabella 2.3 si osserva come ci possono essere differenze in termini di percentuale di errore anche dell'ordine del 25%.

Tab. 2.3 – Accuratezza in valutazioni volumetriche su nuvole di punti ricavate da tecniche UAV-SfM e TLS.

Data set	Volume (m <sup>3</sup> )	Error (%)
TLS	0.0151	—
UAV-10 m	0.0157	3.97
UAV-20 m	0.0189	25.2

Il difetto più rilevante di tali tecnologie di restituzione è la necessità di una post elaborazione dei dati, necessaria per una restituzione tridimensionale della struttura indagata.

### 2.3.1.1 Rilevo fotogrammetrico mediante drone

La restituzione fotogrammetrica è il procedimento mediante il quale è possibile pervenire dai fotogrammi di un determinato oggetto alla sua rappresentazione grafica o numerica<sup>2</sup>. L'adozione di metodologie di rilievo aereo di prossimità e restituzione fotogrammetrica, eseguite mediante utilizzo di uno UAV, consente di generare, in tempi rapidi e con investimenti ridotti, un modello tridimensionale dell'oggetto indagato. Tale tecnica di rilievo, che utilizza una serie di immagini bidimensionali per ricostruire la struttura tridimensionale di una scena o di un oggetto, viene definita *Structure from Motion* (SfM). Il rilievo fotogrammetrico di un oggetto eseguito mediante utilizzo di UAV richiede una camera digitale, un apparato interno che registra posizione GPS e assetto del velivolo (IMU) ad ogni fotogramma acquisito e uno schema di acquisizione di immagini ben preciso durante il volo. La prima fase di una restituzione fotogrammetrica di un oggetto tramite UAV consiste nel sorvolo della struttura, spesso eseguita secondo un percorso programmato a priori. Le immagini in fase di sorvolo del drone devono essere acquisite ad intervalli regolari, garantendo una sovrapposizione (*overlapping*) minima di circa 60-65% e una differenza di angolo massima del 15-20% tra due foto acquisite consecutivamente.

Un software di pianificazione del volo (*flight planning software*) consente di progettare il tracciato di volo e i parametri che definiscono le modalità di acquisizione delle immagini. Tra i software più utilizzati figurano:

- Intel Mission Control<sup>9</sup>.
- DJI Ground Station pro.



### 2.3.1.2 Restituzione fotogrammetrica dell'oggetto

Nel processo di restituzione fotogrammetrica le immagini georeferenziate acquisite vengono processate da un software di restituzione grafica (*Reality Modeling Platforms*). Tra i software di restituzione fotogrammetrica più utilizzati figurano:

- Pix4D Mapper
- ContextCapture Bentley<sup>10</sup>
- ReCap Autodesk<sup>11</sup>
- Propeller PPK<sup>12</sup>
- MetaShape Agisoft<sup>13</sup>

Tali software permettono, attraverso un'elaborazione delle immagini acquisite, di creare il modello digitale dell'oggetto (*Digital Twin*).

Attraverso il rilevamento dei punti chiave di ogni immagine, viene calcolata la relazione geometrica tra le immagini. Ciò consente al software di derivare le informazioni sulla profondità dei punti chiave e di inserirli in un unico sistema di coordinate. Tali programmi esistenti permettono di generare vari output tra cui: Ortomosaico, Nuvola di punti a colori, Mesh tridimensionale con texture, Ortopiano, Modello Digitale del Terreno (DTM), Modello Digitale della Superficie (DSM) e Modello Digitale di Elevazione (DEM).

### 2.3.1.3 Vettorizzazione delle nuvole di punti

Una nuvola di punti è una raccolta estesa di punti acquisiti da scanner laser 3D o altre tecnologie per creare rappresentazioni 3D di strutture esistenti<sup>4</sup>.

Le estensioni più comuni dei file contenenti le nuvole di punti sono *ZFS* e *ZFC* per i laser scanner del produttore *Z+F* e *PTX* per quelli di *Leica*. Le nuvole di punti generate da software di trattamento di immagini hanno generalmente estensione *las*, *laz* o *xyz*. Tali estensioni sono supportate da numerosi software commerciali, come ad esempio *Quick Terrain Reader* o *AutoCAD*, che però ne consentono la sola visualizzazione. Le nuvole di punti, affinché possano essere modificate ed integrate in modelli più complessi, ad esempio *CAD* o *BIM*, devono essere preventivamente trasformate in immagini vettoriali.

La vettorizzazione consiste nell'identificazione di gruppi di punti contenuti nella nuvola di punti e nella loro trasformazione in superfici piane, mesh a maglia triangolare o segmenti.

Esistono numerosi programmi commerciali in grado di eseguire la vettorizzazione della nuvola di punti, tra cui *ReCap* di *Autodesk*, *Pix4Dsurvey* di *Pix4D*, *Cyclone* di *Leica*. Tra i programmi a licenza gratuita ci sono ad esempio *CoudCompare* e

*Meshlab*. La vettorizzazione comporta la generazione di un file importabile in software vettoriali. Ad esempio, la conversione in formato proprietario Autodesk *Rcp* o *Rcs* permette l'importazione in Revit o *AutoCAD* di Autodesk. Esistono inoltre plugin, come *CloudWorx* di Leica, che consentono di lavorare con nuvole di punti direttamente in un software *CAD*.

#### 2.3.1.4 Ispezioni di ponti tramite droni

Molte società di ingegneria, da ormai più di cinque anni, sfruttano assieme l'utilizzo di droni e di tecniche di restituzione fotogrammetrica, così da ottimizzare lo scambio di informazioni tra enti diversi e il loro storage[21]. La figura 2.2 ne mostra un esempio.



Fig. 2.2 – Esempio di fasi di restituzione fotogrammetrica tramite drone inserite in un contesto di ispezione [21].

La prima fase consiste nel sorvolo della struttura da parte del drone, dopo averne stabilito tracciato e schema di acquisizione. I dati ricavati vengono portati in un software per crearne così il modello digitale. Con un modello tridimensionale della struttura è possibile annotare note di ispezione e misurare area e superficie di qualsiasi elemento. Inoltre, fessure, delaminazioni ed altri difetti possono essere evidenziati nel modello stesso. Molti software commerciali associano autonomamente ogni immagine scattata dal drone alla corrispondente area del modello tridimensionale, consentendone una rapida consultazione da parte dell'operatore. Quindi, non è più necessario che l'operatore cataloghi manualmente le foto acquisite in seguito all'ispezione.

In figura 2.3 è mostrata una schermata tipo del software commerciale Pix4D.

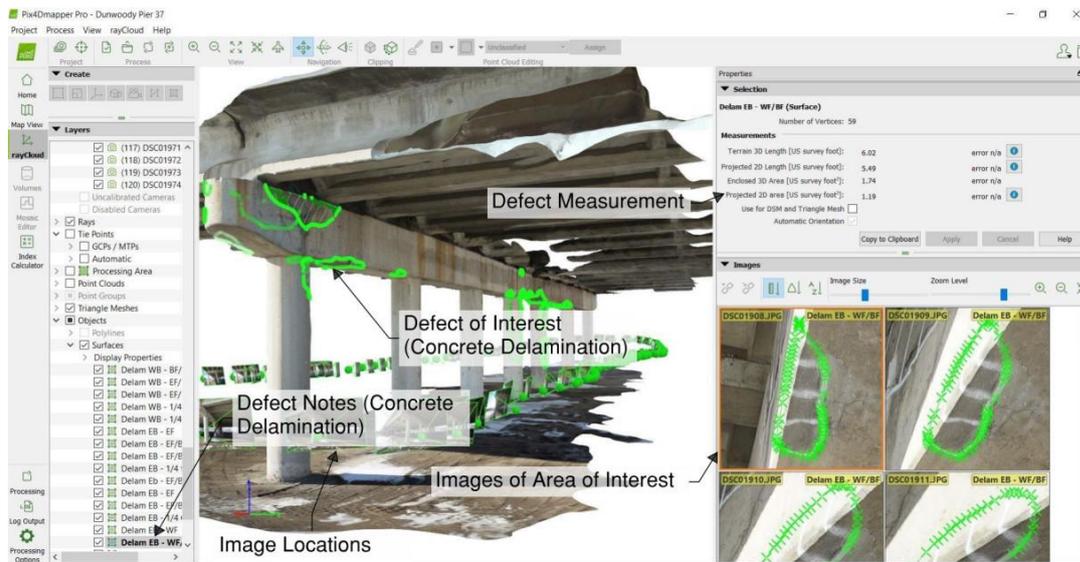


Fig. 2.3 – Esempio di ricostruzione tridimensionale operata dal programma Pix4D [21].

Il modello tridimensionale del ponte, costruito in seguito ad un'ispezione visiva, rappresenta un'istantanea delle condizioni del ponte in un certo istante temporale. La creazione di più modelli tridimensionali del ponte, in seguito ad ispezioni susseguitesesi nel tempo, consente di osservare il deterioramento del ponte durante la sua vita utile e valutare azioni correttive, se necessarie.

## 2.4 Tecnologie di restituzione di modelli in tempo reale

Le tecnologie di acquisizione precedentemente discusse possono essere impiegate anche per una mappatura in tempo reale delle superfici. Gli algoritmi che consentono di ricostruire la mappa di un ambiente in tempo reale tenendo traccia della posizione del dispositivo sono definiti *simultaneous localization and map building (SLAM)* e fanno uso proprio di tecniche di odometria. Ad esempio, l'odometria LiDAR con NDT può essere integrata in un algoritmo *SLAM* su veicoli autonomi[22], con uso di GPS. In particolare, gli algoritmi di tipo SLAM per la mappatura di superfici, luoghi e oggetti possono essere utilizzati anche su UAV oltre che su veicoli autonomi. Ciò consente di estendere enormemente il campo di applicazione di tale tecnologia, rendendola peraltro adatta anche all'utilizzo in luoghi di difficile accesso. Tale tecnologia può pertanto essere applicata anche in ambito ispettivo per la realizzazione di un modello tridimensionale del ponte o di qualsivoglia struttura. Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi metodi per la generazione di nuvole di punti in tempo reale, tra cui:

- **Lidar Odometry and Mapping(LOAM)[23]:** È un metodo di mappatura delle superfici in tempo reale che utilizza odometria LiDAR e sensore GPS montati su un veicolo, senza utilizzo di camera e sensore IMU.
- **Visual-Lidar Odometry and Mapping (V-LOAM)[24]:** È un metodo di mappatura delle superfici in tempo reale in cui vengono combinati assieme odometria visiva ed odometria LiDAR per la restituzione di nuvole di punti. Il sistema si basa su un dispositivo proprietario che integra sensore fotografico e LiDAR.
- **Hierarchical Graph-based HG-SLAM[25]:** È un metodo di mappatura delle superfici in tempo reale in cui vengono combinati assieme odometria visiva inerziale e odometria LiDAR con *Normal Distribution Transform* per la restituzione di nuvole di punti. Il sistema si basa su un dispositivo che integra sensore fotografico, LiDAR, IMU e GPS, in grado di funzionare anche in totale o parziale assenza di segnale GPS. In figura 2.4 è fornita una schematizzazione del sistema.

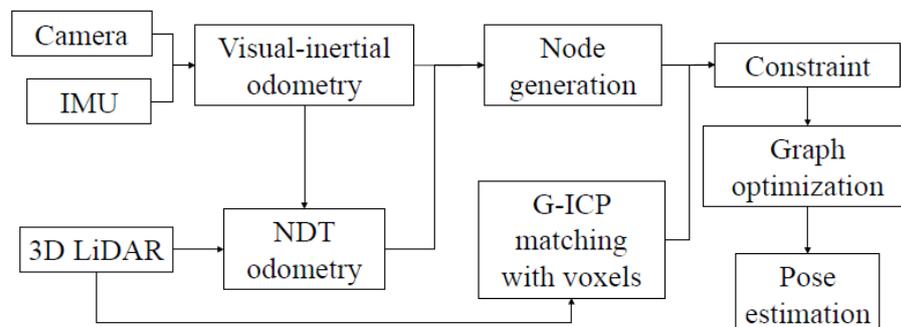


Fig. 2.4 – Esempio di approccio per la restituzione 3D di una struttura basato sul Graph-Based SLAM[25].

Le posizioni successive occupate dal dispositivo in assenza di segnale GPS, indicate come sub-nodi, vengono vincolate tra loro attraverso un'ottimizzazione locale. Queste ultime vengono poi vincolate alle posizioni occupate dal dispositivo in cui era nota la posizione GPS, dette super-nodi, attraverso un'ottimizzazione globale. Ogni gruppo di sub-nodi viene quindi associato ad un super-nodo e ottimizzati indipendentemente dal resto dei nodi. Il metodo di mappatura appena descritto è stato integrato in droni ed utilizzato in ambito di ispezione visiva di ponti. Le ispezioni con UAVs basate su approccio HG-SLAM hanno il vantaggio di ottenere mappature della struttura ad elevata precisione, anche in prossimità di strutture metalliche o in zone coperte dalla struttura in cui vi è assenza di segnale GPS.

## 2.5 Caso studio: Rilievo e Restituzione Fotogrammetrica

È stata qui indagata la possibilità di costruzione di modelli tridimensionale a partire da immagini e/o filmati raccolti da drone. Questa tipologia di ricerca è finalizzata alla realizzazione di un modello 3D esplorabile della struttura su cui posizionare i difetti rilevati dal sorvolo del drone e su cui annotare note ed osservazioni scritte. Tra i vari software attualmente presenti sul mercato si è scelto di utilizzare Pix4D Mapper<sup>5</sup>, in quanto è stato possibile utilizzare una versione di prova priva di limitazione sul numero di immagini utilizzabili per la modellazione. Per il sorvolo è stato utilizzato il drone Phantom 4 Pro V2.0 prodotto dalla DJI<sup>6</sup>. Aspetto e caratteristiche principali del drone sono mostrate rispettivamente in figura 2.5 e tabella 2.4.



Fig. 2.5 – Immagine del drone commerciale utilizzato per il rilievo<sup>6</sup>.

Tab 2.4 – Scheda tecnica delle caratteristiche principali del velivolo<sup>8</sup>.

<b>Caratteristiche principali</b>	<b>Valore</b>
Peso	1375g
Dimensione diagonale	350 mm
Sistemi di posizionamento satellitare	GPS/GLONASS
Autonomia di volo	30 minuti
Sensore fotografico	CMOS 1" 20 Mpx
Obiettivo	FOV 84° 8,8 mm/24 mm f/2.8 - f/11
Lunghezza focale	24mm
Formato immagine di output	Jpeg
Dimensione immagine di output	5472 × 3648

La metodologia di sorvolo e di acquisizione è stata definita mediante il software integrato DJI Ground Station Pro<sup>7</sup>. Le informazioni del sistema utilizzato per la generazione della nuvola di punti sono indicate nella tabella 2.5.

Tab 2.5 – Informazioni del sistema utilizzato per le analisi.

Hardware	CPU: Intel Core i7-7700HQ CPU 2.80GHz RAM: 16GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1050
Operating System	Windows 10 Home, 64-bit

## 2.5.1 Primo caso studio: Complesso di edifici

### 2.5.1.1 Programmazione del volo

È stata rilevata un'area rurale abitata di 4200 m<sup>2</sup> in località Piemonte, Italia. Il rilievo dell'area, diviso in due percorsi di volo, è stato programmato mediante software fornito dal produttore del drone ed è visibile in figura 2.6.



Fig. 2.6 – A sinistra e destra sono mostrati rispettivamente il primo ed il secondo percorso di volo, individuati dal colore verde. L'area di interesse è individuata dall'area poligonale di colore blu.

Durante il sorvolo sono state acquisite 153 immagini georeferenziate, secondo uno schema di acquisizione impostato tramite software proprietario. In figura 2.7 è mostrata a titolo di esempio una delle immagini utilizzate per il rilievo.



Fig. 2.7 – Immagine catturata da camera digitale integrata nel drone *Phantom 4 Pro V2.0*.

I parametri di sovrapposizione longitudinale e trasversale impostati hanno permesso un rilievo ottimale dell'area, eseguito ad una quota di volo di circa 60 metri. La particolare camera digitale equipaggiata e la quota di volo impostata

definiscono assieme la risoluzione dell'immagine, che in questo caso è pari a 1,6 cm per pixel. In tabella 2.6 sono elencati i parametri di acquisizione impostati per i due sorvoli effettuati.

Tab 2.6 - Parametri di Acquisizione impostati per i due sorvoli dell'area di interesse.

Parametri di Acquisizione	Sorvolo 1	Sorvolo 2
Sovrapposizione longitudinale	92 %	92 %
Sovrapposizione trasversale	85 %	83 %
Angolo tra asse drone e camera	146 °	146 °
Angolo di scatto	parallelo al tracciato	parallelo al tracciato
Intervallo di scatto	3 s	3 s
Risoluzione	1.6 cm/pixel	2.0 cm/pixel

Sono stati progettati due percorsi di volo, ognuno dei quali composto da tre percorsi lineari di acquisizione immagini, così da consentire una sovrapposizione trasversale delle immagini adeguata al rilievo. I parametri di volo impostati sono mostrati in tabella 2.7.

Tab 2.7 - Parametri impostati per i due sorvoli dell'area di interesse.

Parametri di volo	Sorvolo 1	Sorvolo 2
Lunghezza complessiva dei voli	365 m	474 m
Punti di riferimento	6	6
Numero di percorsi lineari	3	3
Area coperta	4200 m <sup>2</sup>	8300 m <sup>2</sup>
Altitudine rispetto al suolo	57.4 m	75.4 m
Velocità di crociera	5.4 Km/h	7.1 Km/h

Le immagini acquisite durante il volo sono state utilizzate nel software *Pix4D Mapper* per generare una nuvola di punti di estensione *las*. La figura 2.8 mostra il tracciato di volo e la posizione in cui ogni immagine è stata acquisita, all'interno del software Pix4D.

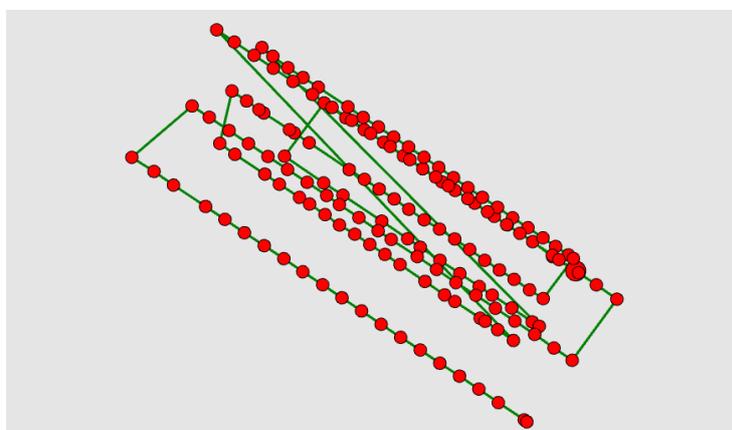


Fig. 2.8 – Geolocalizzazione delle fotografie acquisite nel sistema geodetico di riferimento WGS84 e geode EGM 96.

### 2.5.1.2 Calibrazione e incertezze sul posizionamento

La posizione e l'orientamento della camera in corrispondenza di ogni acquisizione avvenuta durante il volo viene calibrata dal software durante la ricostruzione della nuvola di punti. Le immagini la cui calibrazione ha esito negativo non verranno utilizzate per la generazione dell'output. Nei dettagli di calibrazione mostrati in tabella 2.8 è possibile osservare che tutte le immagini sono state utilizzate per la costruzione del modello.

Tab 2.8 – Numero di immagini calibrate con successo e delle immagini geolocalizzate.

Numero di immagini calibrate	153 sul totale 153
Numero di immagini geolocalizzate	153 sul totale 153

In figura 2.9 è mostrato l'orientamento dei fotogrammi che hanno permesso di generare la nuvola di punti, prima e dopo la fase di calibrazione.

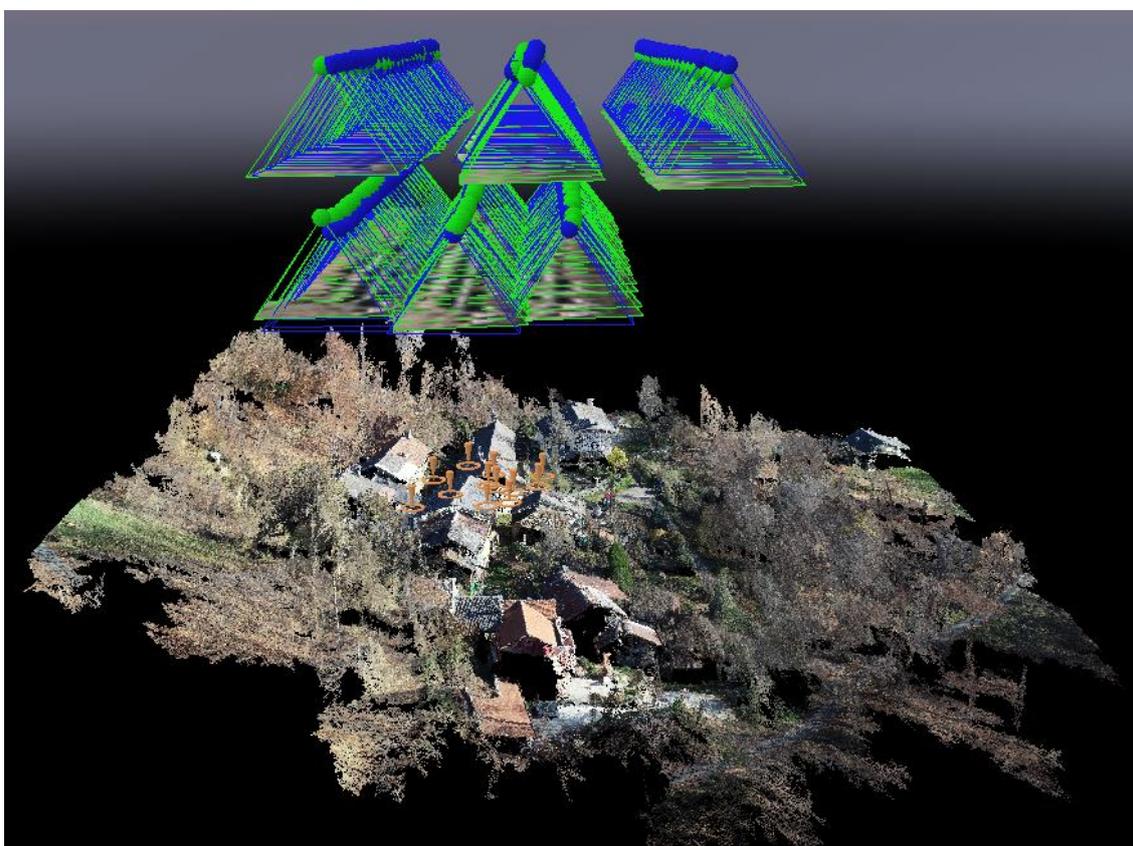


Fig. 2.9 – Posizione ed orientamento della camera per ogni acquisizione. In blu e in verde sono rappresentati rispettivamente posizione ed orientamento della camera prima e dopo la calibrazione.

La posizione della camera prima e dopo la calibrazione è mostrata in un piano orizzontale in figura 2.10, relativamente ad un piano orizzontale.

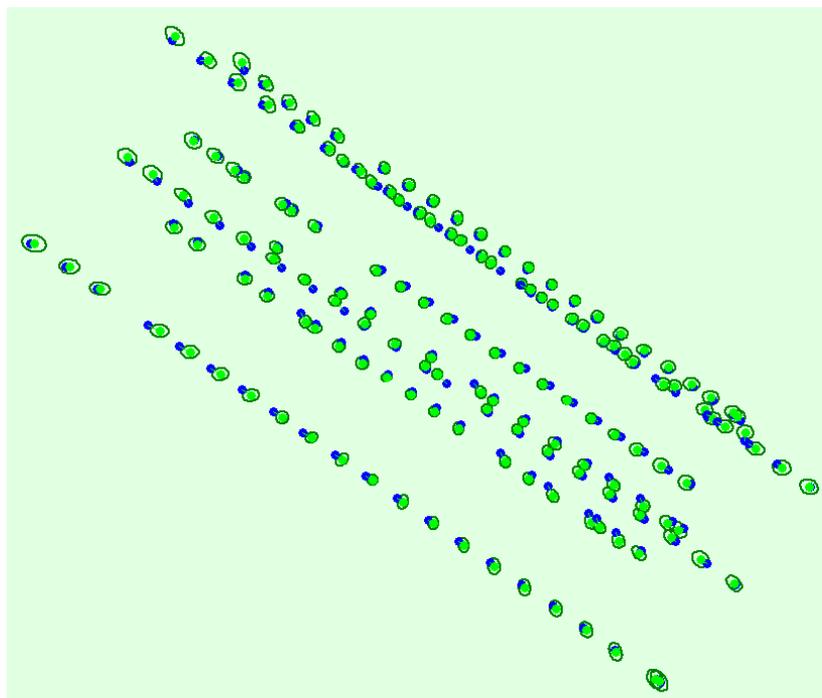


Fig. 2.10 - Distanza tra posizioni dell'immagine prima (in blu) e dopo (in verde) la calibrazione, mostrata nel piano orizzontale. In verde scuro sono rappresentate le ellissi di errore relative all'incertezza sulla posizione assoluta della camera.

L'ellisse di errore è riferita alle incertezze del posizionamento assoluto dei punti dopo la calibrazione.

La posizione assoluta della camera in corrispondenza di ogni acquisizione è descritta da sei gradi di libertà, di cui tre traslazionali e tre rotazionali. Gli errori di posizionamento assoluto dopo la calibrazione sono descritti nella tabella 2.9.

Tab. 2.9 – Media e deviazione standard dell'incertezza nella direzione X,Y e Z e nei tre angoli di orientamento delle posizioni assolute della telecamera.

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
<b>Media</b>	0.107	0.103	0.174	0.053	0.054	0.069
<b>Deviazione Std.</b>	0.020	0.016	0.003	0.001	0.001	0.000

### 2.5.1.3 Generazione della nuvola di punti

Una volta generata la nuvola di punti è possibile eseguire operazioni di misura di superfici e lunghezze. In figura 2.11 è mostrata la nuvola di punti generata dal software.

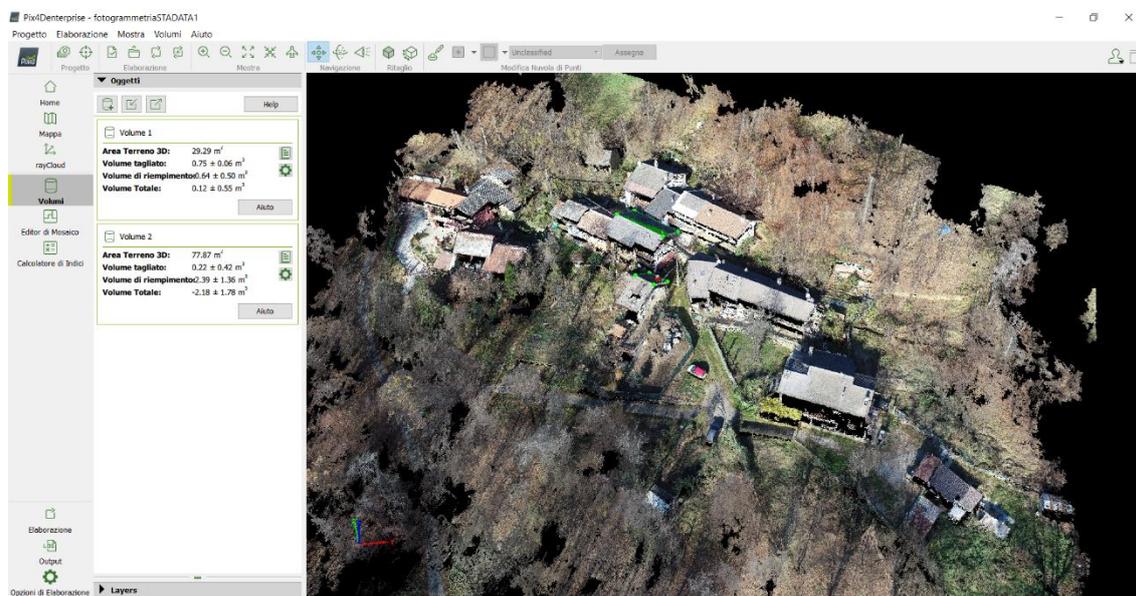


Fig. 2.11 – Schermata di Pix4D Mapper in cui è mostrata la nuvola di punti ed in cui è possibile calcolare il volume di superfici o lunghezze sulla stessa nuvola di punti.

Si può osservare, nella figura 2.11, che le superfici laterali degli edifici sono state solo in parte restituite nella nuvola di punti, in quanto la particolare metodologia di acquisizione non ne ha consentita una acquisizione completa.

Al termine della generazione del modello viene generato un documento denominato *Quality Report*, in cui sono indicate le caratteristiche del file generato. In tabella 2.10 sono indicati i parametri fondamentali della nuvola di punti generata.

Tab 2.10 – Dettagli sulla generazione della nuvola di punti del programma *Pix4DMapper*.

Parametri nuvola di punti	Valore
Tempo di generazione	1h 11m 18 s
Numero di punti densificati	12046599
Densità media per m <sup>3</sup>	695.12
Dimensione nuvola di punti	123.094 KB
Estensione file	.xyz



La nuvola di punti viene utilizzata dal software per generare una mesh a maglia triangolare, i cui dettagli sono mostrati in tabella 2.11.

Tab 2.11 - Dettagli sulla generazione della mesh. Il file di estensione obj contenente la mesh è associato ad un file di estensione jpg contenente la texture delle superfici.

<b>Parametri Mesh</b>	<b>Valore</b>
Tempo di generazione	0h 08m 17 s
Dimensione Mesh	170376 KB
Estensione file Mesh	.Obj
Dimensione texture della mesh	21319 KB
Estensione file texture	.jpg

Il programma è in grado di generare anche un Digital Surface Model(DSM) e un Ortomosaico dell'area rilevata, i cui dettagli sono mostrati in tabella 2.12.

Tab 2.12 – Dettagli sulla generazione di DSM e Ortomosaico del programma Pix4DMapper.

<b>Parametri DSM e Ortomosaico</b>	<b>Valore</b>
Time for DSM Generation	0h 04m 36 s
Time for Orthomosaic Generation	0h 28m 02 s
Dimensione DSM	2641 KB
Estensione file DSM	.Tif
Dimensione Ortomosaico	161695 kb
Estensione file Ortomosaico	.Tif

## **2.5.2 Secondo caso studio: complesso di edifici**

### **2.5.2.1 Programmazione del volo**

È stato qui rilevato un complesso di edifici situato in località Piemonte, Italia. Il rilievo è stato in parte eseguito mediante percorso pre-programmato via software ed in parte eseguito manualmente. A causa della presenza di vegetazione non è stato possibile definire un percorso di volo predefinito per rilevare le facciate laterali dell'edificio, rendendone necessario un rilievo manuale. Durante il sorvolo sono state acquisite 137 immagini georeferenziate, secondo uno schema di acquisizione impostato tramite software proprietario.

In figura 2.12 è mostrata a titolo di esempio una delle immagini utilizzate per il rilievo.

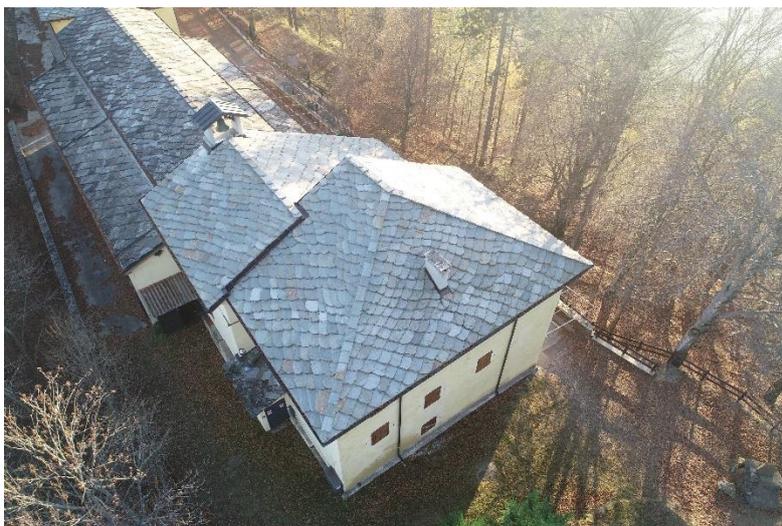


Fig. 2.12 – immagine catturata da camera digitale integrata nel drone Phantom 4 Pro V2.0.

In tabella 2.13 sono elencati i parametri di acquisizione impostati per il sorvolo.

Tab 2.13 - Parametri di Acquisizione impostati.

Parametri di Acquisizione	Valore
Sovrapposizione longitudinale	92 %
Sovrapposizione trasversale	85 %
Angolo tra asse drone e camera	146 °
Angolo di scatto	Parallelo al tracciato
Intervallo di scatto	3 s

La figura 2.13 mostra il tracciato di volo e la posizione in cui ogni immagine è stata acquisita all'interno del software Pix4D.

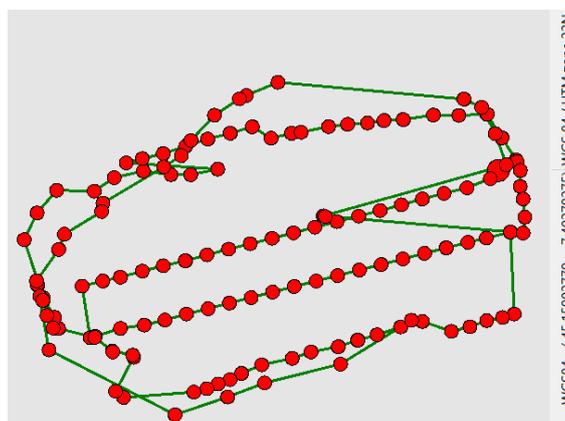


Fig. 2.13 – Geolocalizzazione delle fotografie acquisite nel sistema geodetico di riferimento WGS84.

### 2.5.2.2 Calibrazione e incertezze sul posizionamento

Nei dettagli di calibrazione mostrati in tabella 2.14 è possibile osservare che non tutte le immagini sono state utilizzate per la costruzione del modello.

Tab 2.14 – Numero di immagini calibrate con successo e delle immagini geolocalizzate.

<b>Numero di immagini calibrate</b>	135 sul totale 137
<b>Numero di immagini geolocalizzate</b>	137 sul totale 137

In figura 2.14 è mostrato l'orientamento dei fotogrammi che hanno permesso di generare la nuvola di punti, prima e dopo la fase di calibrazione.

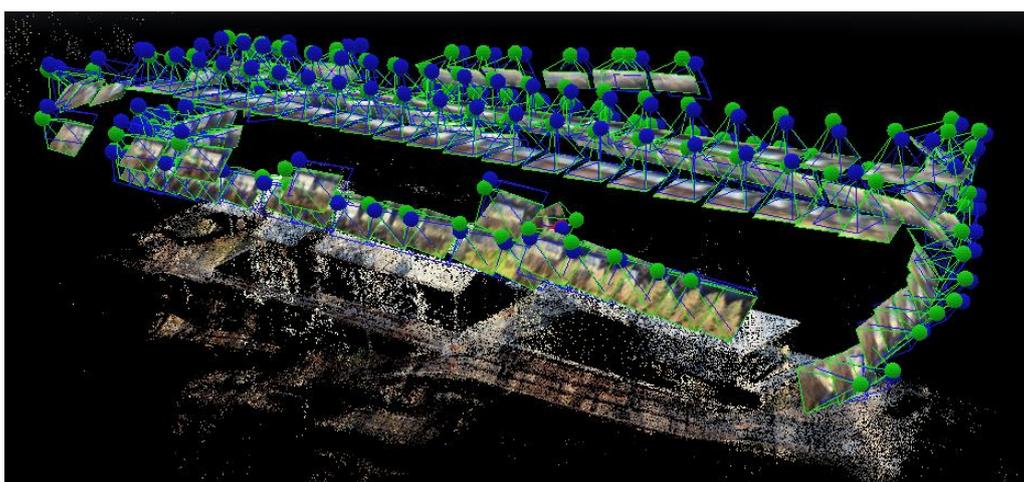


Fig. 2.14 – Posizione ed orientamento della camera per ogni acquisizione. In blu e in verde sono rappresentati rispettivamente posizione ed orientamento della camera prima e dopo la calibrazione.

La posizione della camera prima e dopo la calibrazione è mostrata in un piano orizzontale in figura 2.15, relativamente ad un piano orizzontale.

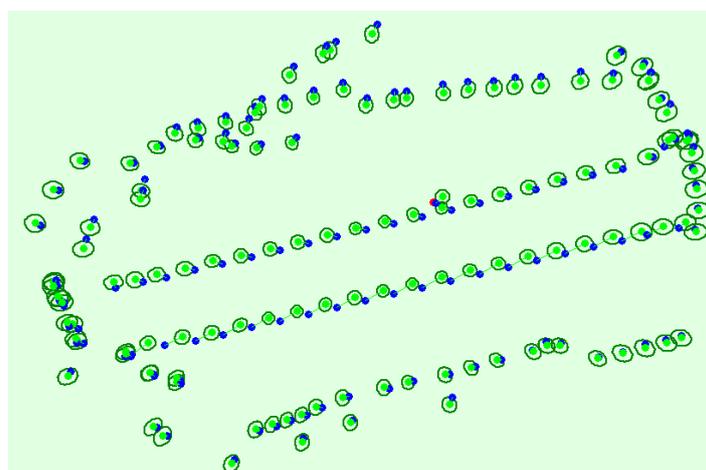


Fig. 2.15 - Distanza tra posizioni dell'immagine prima (in blu) e dopo (in verde) la calibrazione, mostrata nel piano orizzontale. In verde scuro sono rappresentate le ellissi di errore relative all'incertezza sulla posizione assoluta della camera.

Gli errori di posizionamento assoluto dopo la calibrazione sono descritti nella tabella 2.15.

Tab 2.15 – media e deviazione standard dell'insieme dei valori di posizione assoluta della fotocamera e incertezze sull'orientamento del totale di immagini.

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
<b>Media</b>	0.134	0.147	0.228	0.094	0.086	0.121
<b>Deviazione std.</b>	0.012	0.026	0.004	0.013	0.007	0.035

### 2.5.2.3 Generazione della nuvola di punti

In figura 2.16 è mostrata la nuvola di punti generata dal software.

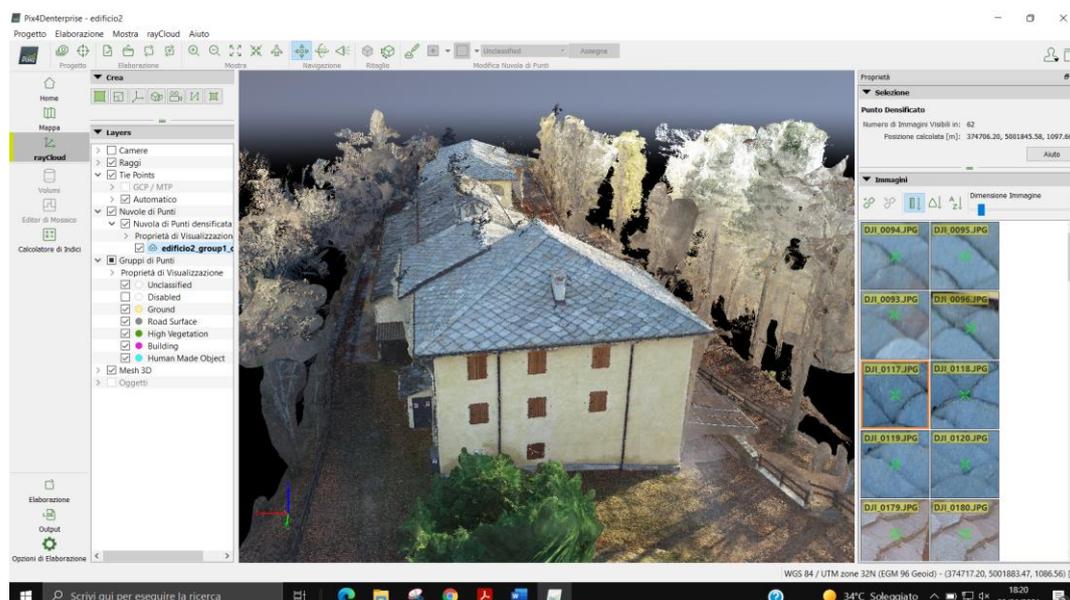


Fig. 2.16 – Schermata di Pix4D Mapper in cui è mostrata la nuvola di punti ed in cui è possibile calcolare il volume di superfici o lunghezze sulla stessa nuvola di punti.

In tabella 2.16 sono indicati i parametri fondamentali della nuvola di punti generata.

Tab 2.16 – Dettagli sulla generazione della nuvola di punti del programma *Pix4DMapper*.

Parametri nuvola di punti	Valore
Tempo di generazione	1h 02m 21 s
Numero di punti densificati	10296318
Densità media per m <sup>3</sup>	5315.75
Dimensione nuvola di punti	341871 KB
Estensione file	.las



La nuvola di punti viene utilizzata dal software per generare una mesh a maglia triangolare, i cui dettagli sono mostrati in tabella 2.17.

Tab 2.17 - Dettagli sulla generazione della mesh. Il file di estensione obj contenente la mesh è associato ad un file di estensione jpg contenente la texture delle superfici.

<b>Parametri Mesh</b>	<b>Valore</b>
Tempo di generazione	0h 08m 10s
Dimensione Mesh	70485 KB
Estensione file Mesh	.Obj
Dimensione texture della mesh	21757 KB
Estensione file texture	.jpg

## 2.6 Integrazione con metodologie di rilevazione del danno

Le ispezioni *TLS-Based*, così come le *UAV-SfM Based*, forniscono un modello tridimensionale accurato, che consente l'identificazione e la quantificazione del danno strutturale direttamente da quest'ultimo. In particolare, la nuvola di punti ottenuta può essere processata da un programma di identificazione del danno, consentendo una valutazione autonoma dell'indice di degrado della struttura.



## Sitografia del capitolo

1. <https://www.flyability.com/bridge-inspections>
2. <http://www.federica.unina.it/architettura/applicazioni-di-geometria-descrittiva-e-rilievo-architettura/fotografia-rilievo-metodi-strumenti/>
3. <https://www.cowi.com/about/news-and-press/uk-press-releases/six-key-questions-about-uk-bridge-maintenance#main-menu-toggle>
4. <https://knowledge.autodesk.com/it/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ITA/AutoCAD-Core/files/GUID-C0C610D0-9784-4E87-A857-F17F1F7FEEBE-htm.html>
5. <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
6. <https://www.dji.com/it/phantom-4-pro-v2>
7. <https://www.dji.com/it/ground-station-pro>
8. <https://www.dji.com/it/phantom-4-pro-v2/specs>
9. <https://downloadcenter.intel.com/download/28715/Intel-Mission-Control-Software>
10. <https://www.bentley.com/it/products/brands/contextcapture>
11. <https://www.autodesk.it/products/recap/overview?term=1-YEAR>
12. <https://www.propelleraero.com/>
13. <https://www.agisoft.com/>



## Capitolo 3

# Metodologie di valutazione del danno nei ponti

In questo capitolo verranno analizzati i principali metodi di calcolo esistenti per la valutazione e quantificazione del danno nei ponti esistenti. In particolare, verrà valutato il loro utilizzo per la definizione di un ordine di priorità dei ponti, utilizzabile per la programmazione degli interventi manutentivi. Successivamente tutte le metodologie descritte verranno messe a confronto per evidenziarne i vantaggi e svantaggi. Infine, verrà eseguita un'analisi critica delle *Linee guida per i ponti esistenti* attualmente vigenti in Italia, evidenziandone le principali criticità.

### 3.1 Stato di condizione dei ponti nel mondo

L'ispezione visiva di un'opera consiste in una valutazione delle condizioni di degrado di ogni porzione della struttura. Tale valutazione deve essere effettuata secondo criteri oggettivi, tali da renderla confrontabile con le ispezioni effettuate precedentemente. Essa ha la finalità di tenere sotto controllo l'avanzamento del deterioramento e valutare l'esecuzione di eventuali interventi di manutenzione. Ogni paese ha sviluppato la propria metodologia per valutare le condizioni delle strutture, spesso implementate nei propri sistemi BMS. Di seguito vengono mostrate alcune metodologie proposte in letteratura per la valutazione delle condizioni dei ponti.

### 3.1.1 Valutazione del danno con il Metodo del Cias

Il metodo di Valutazione Numerica (MNV) è una metodologia di valutazione delle condizioni di degrado delle strutture basata su ispezioni visive, sviluppata a Bolzano ed adottata da molte amministrazioni provinciali e comunali Italiane.

Il metodo consente di riconoscere i fenomeni di degrado presenti sui ponti, attraverso un'ispezione visiva dell'intera struttura e la compilazione di apposite schede di valutazione.

Il metodo è descritto all'interno del Manuale per la Valutazione dello stato dei Ponti, rilasciato dal Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale di Bolzano (CIAS)<sup>1</sup> nel 2011, il quale definisce i criteri generali per le ispezioni.

Il metodo si basa sul calcolo di due indici correlati allo stato complessivo dell'opera, la Difettosità Relativa  $D_R$  e la Difettosità Assoluta  $D_A$ .

La Difettosità Relativa  $D_R$  rappresenta l'indice dello stato di degrado del singolo elemento strutturale ed è descritta dalla seguente relazione:

$$D_R = \sum G K_1 K_2$$

in cui:

- $G$  rappresenta la gravità del difetto e conseguentemente il peso che esso avrà nella valutazione. Può assumere un valore numerico intero compreso tra 1 e 5 in funzione della possibilità di ridurre la capacità portante, di costituire un pericolo, del rischio di innescare altri difetti e dell'onere economico per il ripristino.
- $K_1$  è il coefficiente di estensione del difetto e può assumere il valore 0.2, 0.5 oppure 1, in base alla sua estensione sull'elemento strutturale. Con valore unitario si intende che il difetto interessa l'intera superficie o lunghezza dell'elemento strutturale.
- $K_2$  è il coefficiente di intensità e può assumere il valore 0.2, 0.5 oppure 1, in base alla sua intensità sull'elemento strutturale.

Le Schede difettologiche rappresentano il riferimento utilizzato per l'assegnazione dei valori  $G$ ,  $K_1$  e  $K_2$ . Ogni Scheda Difettologica si riferisce ad un singolo stato di degrado e contiene descrizione e cause del difetto, immagine di riferimento, correlazioni con altri difetti, interventi da effettuare e indagini necessarie .

Un esempio di Scheda Difettologica è mostrato in figura 3.1.

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


Fig. 3.1 - Porzione di una Scheda Difettologica relativa a calcestruzzo dilavato e ammalorato<sup>1</sup>.

La Difettosità Assoluta  $D_A$  rappresenta l'indice dello stato di degrado dell'intera struttura ed è descritta dalla seguente relazione:

$$D_A = \sum N G K_1 K_2$$

In cui N rappresenta il numero dei singoli elementi strutturali su cui è presente un dato difetto.

$D_A$  permette di stimare i costi necessari per il risanamento tecnologico. Viene compilata una scheda di valutazione numerica dello stato di degrado per ogni tipo di elemento strutturale costituente la struttura. Sono predisposte schede per travi e traversi, spalle, pile, piedritti, solette, giunti, archi, elementi accessori ed elementi di appoggio, suddivise a loro volta in base al materiale costituente: calcestruzzo armato, muratura, legno e acciaio [26]. Ogni scheda riporta tutti i difetti che possono essere riscontrati su quel dato elemento.



Un esempio di scheda di valutazione è mostrato in figura 3.2.

Scheda Ispezione Ponti										Nome amministrazione			LOGO
2 Spalle		N°		Posizione		Materiale: muratura							
Struttura		Località		km:		Ispettore:			data: / /				
N°	Descrizione difetto	visto	G	Estensione K <sub>1</sub>			Intensità K <sub>2</sub>			N° Foto	Note		
				0.2	0.5	1	0.2	0.5	1				
2.1)	Fessure orizzontali	<input type="checkbox"/>	3			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
2.2)	Fessure verticali	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
2.3)	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
2.5)	Macchie di umidità di risalita	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
2.6)	Macchie da dilavamento	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
2.7)	Porzione di muratura mancante	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
2.8)	Riprese successive deteriorate	<input type="checkbox"/>	1			<input type="checkbox"/>							
2.9)	Macchie di colore scuro	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
2.10)	Efflorescenze	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
2.11)	Patina biologica	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
2.12)	Polverizzazione	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
2.13)	Esfoliazione	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
5.1)	Fuori piombo	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
5.2)	Scalzamento	<input type="checkbox"/>	5			<input type="checkbox"/>							
5.3)	Dilavamento del rilevato	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
5.4)	Dissesto del rilevato	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
5.5)	Difetti d'appoggio in neoprene	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
5.6)	Difetti pendoli	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
5.7)	Difetti carrelli	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
5.8)	Difetti d'appoggio compositi	<input type="checkbox"/>	4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

Fig. 3.2 - Scheda di Valutazione numerica dello stato di degrado su elemento strutturale spalla<sup>1</sup>.

Le schede di valutazione permettono il calcolo di  $D_R$  e  $D_A$ . Inoltre, tutti i difetti aventi valore  $G$  pari a cinque vengono singolarmente analizzati, indipendentemente dal valore di  $D_R$ .

### 3.1.1.1 Programmazione degli interventi secondo il metodo del Cias

Il metodo MNV permette all'ente gestore di classificare le opere per gravità di degrado, sulla base di dati oggettivi, consentendo un confronto nel tempo dello stato dell'opera ed una programmazione efficace degli interventi.

Affinché possa essere effettuata una valutazione comparativa sul grado di manutenzione della singola opera d'arte, risulta necessario conoscere il valore massimo che la Difettosità Relativa può assumere per quella data opera.

Il valore  $D_R$  viene quindi confrontato con il valore massimo dei difetti riscontrabili sull'opera stessa, definito  $D_{R,MAX}$ .

Il rapporto  $D_R/D_{R,MAX}$  consente di ordinare i ponti in relazione alla gravità e tipologia dei difetti. Spesso viene definito un valore di soglia del rapporto  $D_R/D_{R,MAX}$ , ad esempio 0.25, superato il quale l'ente gestore programmerà degli interventi di manutenzione. Il metodo MNV è stato integrato in diversi software BMS italiani.



In figura 3.3 si riporta una schermata tratta da un software di gestione ponti italiano, in cui è mostrato un elenco di ponti ordinato sulla base del rapporto  $D_R/D_{R,MAX}$ .

The screenshot shows a software interface for bridge management. At the top, there are filters for zones, cantonieri, and ispettori. Below these are summary statistics for 'Censiti' and 'Ispezionati' bridges. The main part of the interface is a table listing individual bridges with various technical and inspection data.

Cod. Strutt.	Filtro	Descrizione	L (m)	Data	Mesi	Scadenza	NG5	NC	AP	DR	DA	C %	d.NG5	d.NC	d.AP	d.DR	d.DA	d.C %	Dr/DrMax		
EL03A-0010	Frazione Terza Rav	03.A.027 P. via Classiciana - vi	47	11/09	2019	3	11/12/2019	0	5	9	0	29	260	100	0	0	0	1	-497	0	13,1
EL07A-0002	San Pietro in Trent	07.A.075 P. Ronco - via Nuov	5,8	21/11	2017	10	21/09/2018	15	1	7	2	18	32	100	0	0	0	1	0	0	11,1
EL01A-0004	Frazione Prima Ra	01.A.005 P. ferrovia - via Teod	209,2	22/07	2014	3	22/10/2014	62	4	6	0	27	362	100	0	0	0	0	0	0	16,8
EL08A-0028	Santo Stefano	08.A.145 To Finale - via Cardi	2,5	22/10	2014	10	22/08/2015	52	0	6	0	15	28	100	0	0	0	0	0	0	13,5
EL05A-0009	Grattacoppa	05.A.112 P. Lamone - via Grat	97,3	09/09	2019	3	09/12/2019	0	7	6	1	47	598	99	0	0	0	0	0	0	26,4
EL09A-0004	Lido di Savio	09.A.050 P. Cupa - viale Rom	7	27/03	2019	10	27/01/2020	4	6	6	1	44	164	99	0	1	0	5	16	0	31,4
EL09A-0007	Lido di Savio	09.A.053 P. Cupa - via Nullo B	21,2	11/11	2014	3	11/02/2015	58	0	6	2	12	766	76	0	0	0	0	0	0	9,0
EL09C-0003	Ammonite	09.C.029 P. Savio - Via Rome	52,85	01/08	2018	3	01/11/2018	13	4	6	0	46	236	99	0	0	0	0	0	0	22,5
EL09C-0004	Ammonite	09.C.030 P. Savio - Via Rome	52,85	01/08	2018	3	01/11/2018	13	9	6	2	65	252	100	0	0	0	0	0	0	32,0

Fig. 3.3 – Scheda riassuntiva che ordina i ponti in base al rapporto  $D_R/D_{R,MAX}$ [27].

### 3.1.2 Metodo di Valutazione del danno di Pellegrino

Il metodo semplificato di Pellegrino et Al.[28] nasce nel 2009 a seguito delle problematiche emerse di autorità locali e regionali Italiane nella gestione dei ponti. Il metodo consente la valutazione del danno dei ponti mediante un Indice di Condizione. Inoltre, il metodo consente la definizione di ordini di priorità di intervento dei ponti da parte di autorità, mediante la definizione dell' Element Sufficiency Rating (ESR) e del Total Sufficiency Rating (TSR).

Tenuto conto che la condizione della struttura è legata allo stato di deterioramento dei singoli elementi che lo compongono, si utilizza il Condition Value (CV) per definire lo stato di questi ultimi. Per ogni elemento del ponte si valuta il CV, che può assumere sei valori, legati a diversi livelli di deterioramento, come mostrato in tabella 3.1.

Tab. 3.1 – Valori dell'indice CV in base al livello di deterioramento dell'elemento[28].

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

Il valore CV viene successivamente convertito nell'indice Condition Factor (CF), secondo una tabella. Ad ogni elemento del ponte viene associato un peso W ed



un *Location Factor* (LF), a seconda che si tratti di un elemento strutturale o non strutturale e della tipologia specifica dell'elemento. Affinché non intervengano fattori soggettivi nella valutazione del CV, occorre definire per ogni tipologia di elemento del ponte una specifica scheda tecnica. Tali schede presentano struttura simile alle schede difettologiche definite nel metodo MNV. Un esempio è mostrato nella tabella 3.4.

Tab. 3.2 – Esempio di scheda tecnica per la definizione del CV di pile in CA[28].

Material	Description	Visual aspects	Possible causes	CV
Concrete	No judgement			0
Concrete	No significant defects	No defects		1
Concrete	Minor defects not related to damage	Superficial defects of concrete Superficial removing of previous repair	Construction errors Freeze-thaw phenomena, run-off, infiltration of water, overload, river current actions (for piers in river), shrinkage, temperature variations, localized tension on abutments, absence or lack of functionality of supports	2
Concrete	Defects that could cause moderate damage	Regular grid of thin cracks ( $w < 0.3$ mm) No deep cracks on the top ( $w < 0.3$ mm) Some exposed bars Moisture traces on the top Any protective elements corroded Accidental superficial damages (only concrete cover involved) Extensive and deep cracks ( $w > 0.3$ mm)	Insufficient rebars Lack of waterproofing, no drainage Physical or chemical agents Impact of vehicles, impact of vessels, solid transport (piers in river) Freeze-thaw phenomena, shrinkage, temperature variation, carbonation, chloride attacks, alkali-aggregate (AAR) or alkali-silicate (ASR) reaction, overloads, high localized tensions Initial sulphur attack	3
Concrete	Severe defects that cause damage	Network of horizontal and vertical cracks with branches around the aggregate's particles Concrete discoloration, rust stains Infiltrations of water, efflorescence, scaling, traces of salts Non negligible accidental damages (concrete cover involved until rebars) Craters, detachments, delamination	Carbonation, chlorides, problems in the drainage system and waterproofing, poor quality of concrete, deposits of salts Impact of vehicles, impact of vessels, solid transport (piers in river) Freeze-thaw phenomena, insufficient rebars, carbonation, problems in the drainage system and waterproofing, chlorides, alkali-aggregate reaction Poor quality or porous concrete	4
Concrete	Non-functional or non-existent element	Exposed corroded bars (loss of section $< 20\%$ ) Percolation of water, salt deposits, stalactites Accidental significant damages (damaged rebars) Great detachment of concrete	Lack of waterproofing, no drainage, use of chlorides Impact of vehicles, impact of vessels, solid transport (piers in river) Freeze-thaw phenomena, insufficient rebar, problems in the drainage system and waterproofing, attack of chlorides, alkali-aggregate reaction	5
		Exposed corroded bars (loss of section $> 20\%$ ) Great percolation of water, large deposits of salts and stalactites Absolutely significant damages (cut rebars)	Lack of waterproofing, no drainage, use of chlorides Impact of vehicles, impact of vessels, solid transport (piers in river)	



### 3.1.2.1 Programmazione interventi secondo il metodo Pellegrino et Al.

A partire dall'indice CV è possibile valutare l'indice ESR, che consente di definire le priorità di intervento sulla struttura e pianificare la manutenzione dell'insieme di ponti. L'indice ESR viene valutato per ogni singolo elemento del ponte e lo considera sia al *project level* che al *network level*:

- **Project Level:** La diversa importanza degli elementi costituenti il ponte viene tenuta in conto grazie al *Location Factor*. Gli elementi strutturali hanno maggiore priorità dal punto di vista manutentivo.
- **Network Level:** L'importanza del ponte all'interno della rete viene tenuta in conto in una serie di parametri, tra cui la strategicità dell'opera, il tipo di strada, il livello di traffico, l'età del ponte. I parametri che ne tengono conto sono: Network Bridge Importance (NBI), Road Type (RT), Traffic Index (TI), e Age Factor (AF).

L'indice ESR per un dato elemento del ponte è definito dalla seguente relazione:

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

In cui:

- L'indice NBI dipende dalla presenza di alternative stradali e dalla lunghezza di tali deviazioni.
- L'indice AF dipende dall'anno di costruzione del ponte e considera la maggiore probabilità che in ponti meno recenti siano presenti degradi non visibili.
- L'indice RT dipende dal livello strategico della strada a cui appartiene il ponte, definita dal tipo di strada.

I livelli di urgenza di intervento per gli elementi del singolo ponte sono definiti in tabella 3.3.

Tab. 3.3 – Livelli di urgenza di intervento per i singoli elementi dei ponte[29].

Efficiency level	Urgency level of intervention	ESR
1	Maximum urgency in intervention	1–10
2	Short-term intervention	11–20
3	Medium-term intervention	21–30
4	Long-term intervention	31–100

L'indice TSR, a differenza dell'indice ESR relativo ai singoli elementi, fornisce una valutazione complessiva del ponte, necessaria per stabilire un ordine di



priorità di intervento. Esso è definito dalla media pesata di  $TSR_{real}$  e  $TSR_{min}$ , definita nella seguente relazione:

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

in cui  $TSR_{real}$  e  $TSR_{min}$  rappresentano il valore TSR rispettivamente nella situazione reale e peggiore possibile, mentre  $CoF$  è un fattore di confidenza che tiene conto degli elementi non valutati.  $TSR_{real}$  e  $CoF$  sono espressi di seguito:

$$TSR_{real} = 10 \cdot RF \cdot NBI \cdot AF \left( \frac{\sum_{i=1}^t CF_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^t W_i} \right)$$

$$CoF = 100 \left( \frac{\sum_{i=1}^t W_i}{\sum_{i=1}^t W_i} \right)$$

In tabella 3.4 sono definiti quattro livelli di urgenza di intervento in base al valore assunto dal TSR.

Tab. 3.4 – Livelli di urgenza di intervento per l'intero ponte[28].

Efficiency level	Urgency level of intervention	TSR
1	Maximum urgency in intervention	1–30
2	Short intervention term	31–40
3	Medium intervention term	41–60
4	Long intervention term	61–100

Il metodo di Pellegrino ed Al. consente non solo di individuare i ponti più critici all'interno di una rete attraverso il TSR, ma anche di suggerire gli interventi da eseguire su di essi in base al valore ESR dei singoli componenti. Un esempio di stima degli indici TSR per un'opera dell'ente Concessioni Autostradali Venete S.p.A. è mostrato in figura 3.4.

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

$\sum W_i \cdot m$ elements	68	$TSR_{REAL}$	43	<b>TSR</b>	41
$\sum W_i \cdot n$ elements	86	$TSR_{NV}$	36		

Fig. 3.4 - esempio di stima degli indici TSR<sup>3</sup>.

### 3.1.3 metodo di valutazione del danno proposto da G. Mancini

Il metodo di valutazione del danno definito da Giuseppe Mancini va a modificare per alcuni aspetti il metodo di valutazione del danno proposto dal CIAS e lo rende adatto alla definizione di una scala di priorità degli interventi dei ponti appartenenti ad una medesima infrastruttura viaria.

Il metodo prevede, rispetto a quello originale, l'aggiunta di voci aggiuntive nell'elenco delle difettosità di riferimento per le ispezioni e, per altre voci già presenti, un valore modificato di G. In particolare, sono inserite schede di difettosità relative al rischio frane ed agli ammaloramenti eventualmente rilevabili internamente agli impalcati con sezione a cassone, se presenti. È stata inoltre inserita una distinzione tra la presenza di vespai su zone a bassa e alta sollecitazione su strutture in cemento armato.

L'indice di condizione del singolo elemento costituente il ponte è il medesimo utilizzato dal CIAS, dato dalla seguente relazione:

$$D_R = \sum G K_1 K_2$$

#### 3.1.3.1 Programmazione degli interventi in base al metodo G. Mancini

Il consueto calcolo di  $D_R$  e  $D_{R,max}$  previsto dal CIAS, viene qui accompagnato dalla valutazione di un indice  $I$ , definito dalla seguente relazione:

$$I = \frac{\sum P_i p_i}{\sum p_i}$$

in cui  $P_i$  rappresenta il prodotto di tre coefficienti, valutati in base ai carichi verticali, azioni sismiche e robustezza strutturale, mentre  $p_i$  rappresenta il peso assegnato al generico termine  $P_i$  della sommatoria, generalmente costante per tutte le opere appartenenti ad una medesima infrastruttura viaria.

Si definisce infine un indice globale di valutazione delle opere  $I_{GVO}$ , che consente la definizione della scala di priorità degli interventi, dato dalla seguente relazione:

$$I_{GVO} = (1 - I) d_r$$

in cui  $d_r$  rappresenta il valore di difettosità normalizzato in funzione dell'intervallo di variazione del valore di  $D_R$  per tutti i ponti della rete. In particolare, il valore  $D_R$



del generico ponte viene normalizzato in funzione di  $D_{R,MIN}$  e  $D_{R,MAX}$ , come mostrato nella seguente relazione:

$$d_r = \frac{D_r - D_{r,min}}{D_{r,max} - D_{r,min}}$$

In base al valore assunto da  $I_{GVO}$  si identificano quattro classi che definiscono la priorità con cui è necessario intervenire sull'opera. La limitazione del metodo è l'impossibilità di applicazione a ponti appartenenti a differenti infrastrutture viarie. Si identifica la priorità con cui è necessario intervenire sull'opera, sulla base di quattro classi di priorità.

### **3.1.4 Metodo di valutazione del danno secondo le Linee Guida per i ponti esistenti**

La metodologia di valutazione del danno sui ponti proposta dalle linee guida è equivalente al metodo proposto dal CIAS. Si definisce un indice numerico globale per ogni singolo elemento del ponte dato dalla combinazione dei parametri  $G$ ,  $K_1$  e  $K_2$ , rispettivamente gravità, intensità ed estensione dei difetti rilevati. Lo stato di condizione di ogni elemento costituente il ponte è definito dalla difettosità relativa  $D_R$ , espressa dalla seguente relazione:

$$D_R = \sum_{i=1}^n G K_{1,i} K_{2,i}$$

in cui  $n$  rappresenta il numero di difetti presenti su un dato elemento costituente il ponte.

Tale parametro può anche essere definito per gruppi omogenei di un dato elemento o per l'intero ponte, attraverso somme pesate dei  $D_R$  dei singoli elementi, ai fini di una più efficace pianificazione degli interventi.

Le linee guida non forniscono una formula esplicita per il calcolo dell'indice dello stato di degrado dell'intera struttura, lasciando agli enti gestori la possibilità di definirlo in base alle proprie valutazioni. La definizione della difettosità relativa richiede la compilazione di schede di valutazione dei difetti, definite schede di difettosità, le quali rappresentano un'evoluzione delle analoghe schede previste dal metodo del CIAS. La compilazione di tali schede si basa sulla valutazione soggettiva dell'ispettore e sulla consultazione di apposite schede, necessarie per l'individuazione dei parametri da assegnare ad ogni specifico difetto.

Ogni scheda difettologica contiene i parametri  $G, K_1$  e  $K_2$  analoghi a quelli previsti dal metodo del CIAS ed un esempio è mostrato in figura 3.5.

Distacco del copriferro				
<b>Peso del difetto</b>				
G = 1	G = 2	G = 3	G = 4	G = 5
Estensione $k_1$		0,2 (appena presente)	0,5 (~50% superficie)	1 (~tutta la superficie)
Intensità $k_2$		Sempre = 1		
<b>Descrizione</b>				
<p>Il difetto si riferisce alla mancanza di porzioni di strato di ricoprimento in calcestruzzo delle armature longitudinali e trasversali degli elementi, con conseguente esposizione di queste ultime agli agenti ossidanti e corrosivi.</p> <p>Particolarmente soggette a distacchi di copriferro sono le travi più esterne dei ponti a travata, maggiormente esposte agli effetti degli agenti esterni.</p> <p>Tale fenomeno si concentra spesso in corrispondenza delle zone degli spigoli degli elementi, caratterizzate da un elevato rapporto superficie/volume esposto e quindi più soggette a distacchi.</p>				
				

Fig. 3.5 – Porzione di una scheda difettologica relativa al materiale calcestruzzo armato. [29].

### 3.1.4.1 Programmazione degli interventi secondo le Linee Guida per i ponti esistenti

Il metodo di valutazione del danno previsto delle linee guida sui ponti è inserito in un contesto più ampio, atto alla definizione della CdA del ponte. Le schede di difettosità, utilizzate per la definizione dell'indice di condizione della struttura, vengono qui utilizzate per la valutazione del *livello di difettosità*, legato al corrente stato di conservazione della struttura. Esso è diviso in 5 classi, come mostrato in tabella X, ed è funzione della gravità, intensità ed estensione dei difetti rilevati, nonché dell'elemento strutturale su cui è localizzato e della sua rilevanza sulla stabilità del ponte, definita dalla *pregiudica statica*.

Tab. 3.5 – classificazione del livello di difettosità previsto dalle linee guida sui ponti[29].

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

Il livello di difettosità viene combinato con altri parametri per la definizione della CdA complessiva del ponte, che permette di valutare qualitativamente l'effettiva necessità ed urgenza di intervento nei ponti. I valori assunti dalla CdA sono mostrati in figura 3.6.



Fig. 3.6 - Valori assumibili dalla CdA complessiva del ponte[29].

Nella CdA sono incluse considerazioni sul comportamento strutturale dell'opera, la risposta alle azioni sismiche, il coinvolgimento della struttura in eventuali fenomeni franosi e la presenza di attraversamenti fluviali.

La definizione della CdA permette di definire una programmazione degli investimenti e quindi degli interventi manutentivi da intraprendere sia a livello della singola opera che al livello dell'intera rete a cui appartiene:

- Dal punto di vista del *Network Level*, la definizione della CdA per ogni ponte della rete di competenza consente di definire un ordine di priorità di intervento. Inoltre, il livello 5 delle linee guida definisce quali ponti sono da considerarsi di significativa importanza all'interno della rete dal punto di vista della rilevanza trasportistica e dell'impatto socioeconomico.
- Dal punto di vista del *Project Level*, sono stabilite le azioni da intraprendere sulla singola opera che dipendono dalla specifica CdA assegnata. In particolare, possono essere prescritte valutazioni preliminari e accurate della sicurezza, programmazioni specifiche degli interventi manutentivi, installazione di sistemi di monitoraggio, esecuzione di ispezioni straordinarie. Inoltre, indipendentemente dalla CdA complessiva, le singole classi di attenzione strutturale, sismica, idraulica e frane consentono di indirizzare e approfondire le indagini nella giusta direzione.



### 3.1.5 Metodo di valutazione del danno utilizzato in Slovenia

La metodologia utilizzata per la valutazione delle condizioni dei ponti statali in Slovenia si basa su considerazioni contenute nella pubblicazione della *International Federation for Structural Concrete (Fib)*[30]. Dal punto di vista dei gestori stradali, in Slovenia non sono presenti dei software di supporto ai processi decisionali relativi alla definizione delle priorità di manutenzione e riparazione[31].

L'indice di condizione R dell'intero ponte viene ottenuto sommando gli indici di condizione delle tre componenti che costituiscono l'opera, ossia impalcato, sovrastruttura e sottostruttura. Ognuna di queste tre componenti è costituita da un certo numero di elementi di base, ciascuno dei quali viene valutato dal punto di vista del danneggiamento. L'indice di condizione per il j-esimo elemento del ponte e l'i-esimo tipo di danno è definito dalla seguente relazione:

$$R_{i,j} = B_i K_{1,j} K_{2,i,j} K_{3,i,j} K_{4,i,j}$$

in cui:

- $B_i$  è il valore di valutazione di riferimento per la tipologia di danno i. Può assumere valore compreso tra 1 e 5. Ad esempio, nel caso del difetto denominato "corrosione" può assumere valore unitario nel caso di corrosione delle staffe o valore 5 nel caso di rottura dei cavi precompressi.
- $K_{1,j}$  è un coefficiente di peso che indica l'importanza dell'elemento j. Può assumere valore compreso tra 0.3 e 1.
- $K_{2,i,j}$  è un coefficiente che indica l'intensità del danneggiamento. Può assumere valore compreso tra 0.4 e 1.
- $K_{3,i,j}$  è un coefficiente che indica l'estensione del danneggiamento i sull'elemento j. Può assumere valore compreso tra 0.5 e 1.
- $K_{4,i,j}$  è un coefficiente che indica l'urgenza di intervento sull'elemento j, sulla base di considerazioni di sicurezza e durabilità relative al danno i. Può assumere valore compreso tra 1 e 5.

In particolare,  $B_i$  e  $K_{1,j}$  sono stabiliti a priori ed indipendentemente dall'ispezione, in quanto dipendono solo dal tipo di danno e dall'elemento del ponte dove il danno stesso è localizzato. Tali due coefficienti corrispondono al coefficiente G all'interno delle linee guida sui Ponti. Invece,  $K_{2,i,j}$ ,  $K_{3,i,j}$  e  $K_{4,i,j}$  vengono assegnati dall'operatore in fase di ispezione visiva in base a valori tabellati.



### 3.1.5.1 Programmazione degli interventi in Slovenia

L'indice di condizione del ponte, che prende in considerazione tutti gli elementi appartenenti all'impalcato, sovrastruttura e sottostruttura, è determinato dalla seguente relazione:

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{i,j} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{i,j} K_{1,j} K_{2,i,j} K_{3,i,j} K_{4,i,j}$$

in cui j varia da 1 fino al numero totale n degli elementi di cui è composto il ponte analizzato e i varia da 1 fino al numero totale m di tipi di danno identificati su un dato elemento.

Affinché il coefficiente R, dato dalla somma effettiva dei danni calcolati sulla struttura, possa essere confrontato con altre opere, va diviso per un confidente di riferimento  $R_{ref}$  che tenga conto di ogni tipologia di danno che può essere presente sul ponte. Il *Condition rating* è definito dalla seguente relazione[32]:

$$RC = R/R_{ref}$$

in cui  $R_{ref}$  è espresso in maniera analogia al confidente R, con l'unica differenza che per ogni j- esimo elemento vanno considerati tutti i difetti in esso elencati:

$$R_{ref} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^n R_{i,j} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^n B_{i,j} K_{1,j} K_{2,i,j} K_{3,i,j} K_{4,i,j}$$

in cui t è il numero totale di difetti elencati per il generico elemento j. Per la definizione di  $R_{ref}$  possono essere utilizzati valori unitari dei coefficienti  $K_{2,i,j}$ ,  $K_{3,i,j}$  e  $K_{4,i,j}$ .

### 3.1.6 Metodo di Valutazione del danno negli Stati Uniti d'America

La valutazione delle condizioni del ponte, in accordo con il manuale AASHTO Manual for Bridge Evaluation[14], si basa sulla distinzione tra *elements* e *components* del ponte. I componenti del ponte sono impalcato, sovrastruttura e sottostruttura, a loro volta suddivisi in base ai singoli elementi di base che li costituiscono. L'accuratezza con cui vengono valutate le condizioni dipende dalla capacità dell'ispettore di identificare i componenti del ponte ed i loro elementi[33]. L'ispettore deve assegnare ad ogni componente del ponte una valutazione



complessiva delle condizioni. Tale valutazione deve riflettere la condizione generale del componente piuttosto che eventuali condizioni localizzate. Ogni componente del ponte viene ispezionato ed infine viene assegnato all'intera struttura un valore numerico da 0 a 9, secondo la tabella 3.6.

Tab. 3.6 - Sistema di valutazione delle condizioni utilizzato per impalcato, sovrastruttura e sottostruttura, stabilito dal NBI [16].

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

Tale sistema di valutazione delle condizioni ha natura generale, non prende in considerazione in maniera diretta severità ed estensione dei difetti riscontrati, e può essere utilizzato per qualsiasi componente del ponte e qualsiasi materiale. Inoltre, il regolamento FHWA definisce le azioni da intraprendere in termini di valutazione ed intervento, nel caso in cui si riscontrino delle situazioni critiche sulla struttura, definite *critical findings*. In accordo con FHWA, quando sul componente ispezionato sono presenti dei difetti tali da comprometterne la capacità strutturale, l'ispettore deve assegnare una valutazione più bassa al componente stesso. La valutazione del componente va poi aggiornata in positivo una volta che la situazione critica viene risolta mediante intervento.

La modifica della valutazione del componente si basa sul fatto che una condizione o difetto che impatta la capacità strutturale di un singolo elemento, può impattare anche la performance del componente a cui appartiene. Ciò succede quando severità ed estensione di tali condizioni o difetti sono tali da richiedere un'azione immediata nella struttura.



L'ispettore deve assegnare ad ogni elemento di ogni componente del ponte una valutazione descrittiva delle condizioni, in termini di *good*, *fair* e *poor*, come mostrato in tabella 3.7.

Tab. 3.7 – Valutazione descrittiva delle condizioni per gli elementi del ponte[16].

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

L'ispettore è inoltre tenuto ad indicare qualsiasi carenza o deterioramento riscontrati su ogni singolo elemento di ogni componente, definendone la posizione, dimensione, quantità e severità. Il regolamento FHWA prevede valutazioni ulteriori nel caso di strutture localizzate su corsi d'acqua. Si fornisce un indice di condizione del canale ed opere di protezione, sulla base della tabella 3.8.

Tab. 3.8 - Sistema di valutazione delle condizioni utilizzato per canale ed opere di protezione [33].

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

Si valutano in particolare le condizioni fisiche associate al flusso d'acqua, erosione degli argini, accumulo di detriti sulla sottostruttura e sovrastruttura. Il regolamento FHWA fornisce anche un sistema di valutazione anche per i *Culverts*, che si distinguono dai Ponti in quanto non superano i 20 piedi di



lunghezza. I componenti impalcato, sovrastruttura, sottostruttura, canale ed opere di protezione costituiscono il *Condition Rating*.

Il ponte viene valutato anche in relazione al livello di servizio che esso fornisce sul sistema autostradale di cui fa parte, per la definizione di un *Appraisal Ratings*. I sette elementi utilizzati per tale valutazione sono indicati di seguito[33]:

1. **Structural Evaluation:** valutazione complessiva della struttura, basata sull'indice di condizione più basso tra quello di tutti gli elementi del ponte. Sono qui esclusi gli indici di condizione dei componenti del ponte.
2. **Deck Geometry:** valuta la distanza tra i parapetti della sezione trasversale del ponte e la minima luce verticale al di sopra dell'impalcato.
3. **Under-clearances:** valuta la luce verticale tra l'intradosso del ponte e la strada al di sotto del ponte.
4. **Waterway Adequacy:** valuta l'adeguatezza dell'apertura sotto il ponte per il corso d'acqua.
5. **Approach Roadway Alignment:** Valuta l'allineamento delle estremità del ponte con l'infrastruttura viaria di cui fa parte.
6. **Traffic Safety Features:** Valuta l'adeguatezza delle barriere di protezione sul ponte, quali ringhiere e guardrail.
7. **Scour Critical Bridges:** Valuta le condizioni del ponte riguardo la rimozione di sedimenti intorno alla base di spalle e pilastri del ponte.

Una parte di tali elementi sono funzioni dei dati di inventario del ponte e dati di ispezione. I restanti si basano su osservazioni e dati storici raccolti in ispezioni pregresse.



### 3.1.6.1 Programmazione degli interventi negli Stati Uniti d'America

Lo stato di salute complessivo del ponte, secondo FHWA, viene definito dal *Sufficiency Rating* (S.R.). Il valore del coefficiente S.R. è compreso tra 0 e 100 ed è definito dalla seguente relazione:

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

in cui:

- $S_1$  è il coefficiente di sicurezza e adeguatezza strutturale, valutato anche sulla base del *Condition Rating*.
- $S_2$  riguarda le condizioni di servizio e l'obsolescenza funzionale, valutato anche sulla base dell' *Appraisal Rating*.
- $S_3$  riguarda la strategicità del ponte, valutato ad esempio sulla base degli effetti sulla comunità di una eventuale chiusura.
- $S_4$  è un coefficiente di riduzione che riguarda lunghezza di eventuali deviazioni, caratteristiche di sicurezza del traffico e tipologia di struttura.

Il S.R. viene utilizzato per confrontare tutti i ponti della rete stradale americana per scopi di finanziamento federale. Ad esempio, nel 2008 per ottenere il finanziamento federale per la riparazione del ponte era richiesto un S.R. minore di 80, mentre per la sostituzione era richiesto un valore minore di 50. Oggi alcuni stati utilizzano l'indice S.R. per stabilire l'ordine di priorità degli interventi sui ponti, associando priorità maggiore a valori più bassi dell'indice.

### 3.1.7 Metodo di valutazione del danno in Inghilterra

La metodologia di ispezioni visive, in accordo con la United Kingdom Highways Agency, si basa principalmente sui parametri di *extension* e *severity* del difetto, rispettivamente l'estensione, in termini di lunghezza o area, e la severità del difetto. In particolare, la severità descrive il grado di deterioramento, da uno stato strutturalmente sano ad uno stato di tipo non funzionale o collassato, corrispondenti rispettivamente ai valori 1 e 5. I due parametri sono rappresentati in tabella 3.9.

Tab. 3.9 - Sistema di valutazione delle condizioni del ponte nel Regno Unito[29].

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



Tale metodologia di valutazione riduce ulteriormente la componente di soggettività nella valutazione delle condizioni della struttura.

In Inghilterra si utilizza a livello nazionale il *Bridge Condition Index* (BCI) per monitorare il cambio di stato degli elementi di un ponte[34]. L'indice BCI può assumere un valore compreso tra 0 e 100, in cui valori elevati indicano condizioni migliore dell'opera. L'equazione per il calcolo del BCI è stata sviluppata esclusivamente per i ponti in Inghilterra, ma può essere estesa ad un'ampia varietà di ponti. La relazione che definisce BCI è la seguente[29]:

$$BCI = 100 - F_1 \left[ F_2 \frac{S(E_{fp} S_f)}{N_p} + F_3 \frac{S(E_{fs} S_f)}{N_s} \right]$$

in cui  $E_{fp}$  e  $E_{fs}$  rappresentano i coefficienti per elementi primari e secondari,  $S_f$  è il fattore di estensione e severità, definito dalla combinazione dei parametri estensione e severità, dati rispettivamente da un valore da A a D e da 1 a 4,  $N_p$  e  $N_s$  sono il numero di elementi primari e secondari presenti sul ponte,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  sono fattori numerici assegnati.

Nel caso tutti i difetti presenti sulla struttura vengano classificati come A1 allora il valore di BCI sarà 100. In caso contrario, il valore di BCI sarà più basso. L'indice BCI viene moltiplicato per un *Age Factor*, secondo la seguente relazione:

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

Infine, per prendere in considerazione gli elementi non ispezionati, si introduce il fattore di confidenza CF, presso dalla seguente relazione:

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

in cui  $n$  è il numero di elementi ispezionati e  $n_{tot}$  è il numero totale di elementi costituenti il ponte.

### 3.1.7.1 Software che integrano il Bridge Condition Index

Molti software BMS utilizzati in Inghilterra integrano l'indice BCI nel loro sistema decisionale. Ad esempio, il software BMS Inglese BridgeStation<sup>2</sup> classifica i ponti in cinque classi, sulla base di intervalli di variazione dell'indice BCI, come mostrato in figura 3.7.

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

Fig. 3.7 – Scala di conversione dell'indice BCI utilizzata in BridgeStation<sup>2</sup>.

La base per i calcoli dell'indice BCI di *BridgeStation* è costituita dal Guidance Document for Performance Measurement of Highway Structures rilasciato dalla Highways Agency[35]. In BridgeStation, due indici concorrono alla valutazione di BCI, cioè  $BCI_{AVERAGE}$  e  $BCI_{CRITICAL}$ . Per il calcolo di  $BCI_{AVERAGE}$  si valuta il danneggiamento tutti gli elementi della struttura. Invece, l'indice  $BCI_{CRITICAL}$  è basato esclusivamente sulla valutazione del danno degli elementi critici della struttura, cioè elementi che possono pregiudicare il comportamento globale del ponte. Lo stato manutentivo delle opere in *BridgeStation* viene quindi valutato sulla base della media pesata degli indici  $BCI_{AVERAGE}$  e  $BCI_{CRITICAL}$ , come mostrato nella seguente relazione:

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



## 3.2 Confronto tra le metodologie di valutazione esistenti

Nei paragrafi precedenti sono stati elencati diversi metodi utilizzati nel mondo per la valutazione del danno e la programmazione interventi in ponti esistenti. Tali metodi sono stati confrontati sulla base di alcuni requisiti ritenuti fondamentali per una corretta valutazione. In particolare, si prendono in considerazione:

1. Considerazione di tutti gli elementi della struttura.
2. Considerazione dell'importanza relativa tra i vari elementi della struttura.
3. Considerazione delle caratteristiche di estensione e gravità del danno.
4. Considerazione della posizione del danneggiamento nell'elemento in cui è individuato.
5. Possibilità di confrontare l'indice di degrado tra diverse strutture.
6. Distinzione tra difetti localizzati su elementi più o meno rilevanti.

In tabella 3.10 sono valutate e comparate le sei caratteristiche ritenute importanti dei metodi di valutazione indagati.

Tab. 3.10 - confronto dei metodi di valutazione del degrado sui ponti utilizzati nel mondo. La compilazione con "SI" indica che il metodo soddisfa quel particolare requisito.

<b>Metodi di valutazione del danno</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Highways Agency, Inghilterra	SI	NO	SI	NO	SI	SI
FHWA, Stati Uniti d'America	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Slovenia	SI	SI	SI	NO	SI	SI
CIAS, Italia	SI	SI	SI	NO	SI	NO
Pellegrino et al., Italia	SI	SI	NO	NO	SI	SI
Metodo Mancini, Italia	SI	SI	SI	NO	NO	NO
Linee Guida sui Ponti, Italia	SI	SI	SI	NO	SI	SI

Dall'analisi di queste differenti metodologie emerge che tutte valutano la struttura suddividendola in porzioni più piccole, singolarmente valutate dal punto di vista del degrado. Alcuni metodi non fanno distinzione tra difetti localizzati su elementi più o meno rilevanti né tra posizioni ad alta o bassa sollecitazione di un dato elemento. Tutti i metodi, eccetto quello della FHWA e di Pellegrino et al., considerano nel calcolo dell'indice di condizione l'estensione ed intensità del degrado in maniera esplicita.



### 3.2.1 Considerazioni sulle Linee guida sui ponti esistenti

Le linee guida, nonostante costituiscano una grande novità ed un grande passo in avanti dal punto di vista della gestione dei ponti esistenti, non sono esenti da problemi. Le principali criticità individuate sono elencate nei punti seguenti:

1. **Livello di difettosità:** Il valore dei livelli di vulnerabilità strutturale e sismico, necessari per calcolare le CdA strutturale e sismica, dipendono dal livello di difettosità, norma di progettazione, schema statico, luce, materiale e numero campate. Si nota come il livello di difettosità assume un'importanza marginale rispetto agli altri parametri, i quali rappresentano caratteristiche invarianti dell'opera. Conseguentemente l'avanzamento dello stato di degrado della struttura, così come l'esecuzione di interventi di manutenzione, non porta a rilevanti modifiche della CdA.
2. **Posizione del difetto:** Con riferimento alla scheda difettologica relativa al difetto "armatura ossidata e/o corrosa" per elementi in calcestruzzo armato, non vi è alcuna distinzione in base al tipo di elemento su cui tale difetto è presente né sulla sua specifica localizzazione in quel dato elemento. In particolare, il difetto non assume pesi differenti se presente su un elemento principale come le travi o su un elemento secondario. Non viene inoltre fatta distinzione tra zona sollecitata o poco sollecitata. La presenza di armatura ossidata o corrosa è generalmente meno rilevante nel caso di elementi tozzi come le spalle e elementi bidimensionali come le solette, rispetto ad elementi trave. Ciò nonostante, il difetto "armatura ossidata e/o corrosa" ha stessa gravità ( $G=5$ ) sia nel caso in cui è localizzato su elementi trave che elementi spalle o solette.
3. **Definizione di elementi critici:** La definizione di *Elemento Critico*, riportata nel paragrafo 1.3 delle Linee Guida sui ponti esistenti, non definisce con precisione tutti gli elementi che vi possono appartenere. Inoltre, è discrezione dell'ispettore riconoscere gli elementi critici del ponte al momento dell'ispezione. Si tratta di una valutazione in parte soggettiva, influenzabile da pressioni esterne. Infatti, il riconoscimento di un elemento critico può portare in alcuni casi ad un valore di CdA strutturale e fondazione massimo.
4. **Avvio di indagini approfondite:** Le linee guida non contengono indicazioni specifiche su come le indagini di livello 3 possano essere utilizzate come supporto decisionale per l'attivazione delle indagini di livello 4 o del monitoraggio strumentale. Ad esempio, risulta impossibile stabilire quali tra tutte le opere aventi CdA medio-alta necessitano l'avvio di tali operazioni.



## Sitografia del capitolo

1. <http://www.cias-italia.it/>
2. <https://www.bridgestation.co.uk/>
3. <https://www.ingenio-web.it/24951-la-gestione-della-manutenzione-di-ponti-e-viadotti-tramite-bridge-management-system-con-approccio-bottom-up>





## Capitolo 4

### Reti Neurali

A seguito di qualsiasi ispezione visiva su infrastrutture, le linee guida sui ponti richiedono la compilazione di particolari schede difettologiche. A tal fine risultano necessarie l'identificazione e la catalogazione da parte dell'operatore dei difetti presenti sul manufatto. Nell'ottica di un rilievo fotografico completo del manufatto, eseguito ad esempio mediante drone, è possibile sviluppare un applicativo software che sia in grado, grazie al riconoscimento automatico del danno, di eseguire autonomamente ciò che tradizionalmente viene effettuato visivamente da operatori del settore. A tal proposito, il *Machine Learning* offre un'alternativa più efficiente per l'analisi di grosse quantità di dati, senza richiedere una presenza umana. Non solo il machine learning sta diventando sempre più importante nel campo della ricerca basata su computer, ma gioca anche un ruolo sempre più preminente nella nostra vita quotidiana[36].

Le reti neurali convoluzionali (CNN o ConvNet) sono, al momento attuale, una delle architetture di rete neurale più utilizzate nel deep learning. Tale tipologia di reti neurali, se adeguatamente costruita, permette di riconoscere e classificare le varie tipologie di difetti che possono essere riscontrati sulle strutture civili, mediante analisi della documentazione fotografica raccolta in fase ispettiva.

È teoricamente possibile applicare il deep learning per un'ampia varietà di opere e di materiali: strutture in muratura, calcestruzzo armato, calcestruzzo armato precompresso, acciaio, legno. Più nel dettaglio, sarebbe possibile andare ad indagare anche sull'entità del danneggiamento, cioè quantificarlo in termini di dimensione ed estensione. Nella pratica, ciò risulta di difficile attuazione a causa della grossa mole di fotografie richieste dalla rete neurale per il suo funzionamento. In questo capitolo vengono discusse tutte le basi teoriche necessarie per comprendere correttamente i concetti di base necessari per sviluppare il lavoro.

Il metodo di rilevamento delle fessure proposto è costituito da due elementi fondamentali: classificazione e segmentazione delle immagini. Si descriverà una CNN utilizzata per l'identificazione delle fessure su superfici in calcestruzzo, mostrandone risultati e potenzialità. La rete è stata costruita in Google Colab



sfruttando le API (Application Programming Interface) Python. Il dataset utilizzato risulta proveniente da archivi fotografici accessibili liberamente dalla rete. Il punto di partenza di questo lavoro è un modello già addestrato per un compito di classificazione differente. Di seguito sarà descritta e motivata la struttura di base della rete. Verrà affrontato il problema della scelta dei parametri, tali da massimizzare le performance in termini di rendimento della rete. Infine, si costruirà un metodo di segmentazione, il quale permette di evidenziare le porzioni dell'immagine in cui è presente una fessura.

## 4.1 Apprendimento Automatico

L'Apprendimento Automatico, meglio noto come *Machine Learning* è una branca dell'intelligenza artificiale che ha lo scopo di effettuare previsioni sui dati mediante l'uso di algoritmi di autoapprendimento.

Per apprendimento automatico s'intende quell'insieme di tecniche e strategie volte a migliorare le prestazioni di un sistema nell'esecuzione del suo task in base all'esperienza del sistema stesso [37]. Si possono distinguere quattro diverse tipologie di machine learning:

- **Apprendimento con Supervisione:** Ai dati di input, già provvisti di etichetta, viene applicato un algoritmo di apprendimento al fine di dedurre un modello predittivo, il quale viene poi utilizzato per effettuare previsioni su dati privi di etichetta. In altre parole, si ottiene un modello predittivo in grado di prevedere l'etichetta corretta della classe dei dati che vengono forniti. Il termine "supervisione" si riferisce al fatto che l'insieme di etichette di output che i nostri dati possono assumere sono già note a priori.
- **Apprendimento senza Supervisione:** Non conosciamo in anticipo la risposta corretta quando descriviamo il nostro modello. Infatti, i dati di input non sono provvisti di etichetta. Si osserva la struttura dei dati di input per estrarre informazioni, senza poter contare sulla guida né di una variabile nota relativa al risultato, né una funzione di ricompensa [36].
- **Apprendimento di Rafforzamento:** Un sistema, definito agente, esegue delle azioni attraverso un'interazione con l'ambiente. In base alla risposta dell'ambiente alle azioni eseguite dall'agente, si valutano le prestazioni dell'agente e si fornisce una ricompensa in caso di risultati positivi[35]. L'obiettivo è apprendere un comportamento ottimale a partire dalle esperienze passate<sup>13</sup>.

- **Apprendimento Semi Supervisionato:** Tale sistema di apprendimento prevede l'utilizzo sia di dati etichettati che non etichettati. I primi vengono utilizzati nell'apprendimento al fine di etichettare i dati sprovvisti di etichetta.

Ci interessa in particolar modo la prima delle tre tipologie di machine learning elencate.

#### 4.1.1 Apprendimento con Supervisione

Si parla di apprendimento supervisionato (*supervised learning*) quando un algoritmo impara da dati di esempio associati a risposte già pronte. Lo scopo di questo apprendimento è fare in modo che, quando all'algoritmo vengono sottoposti nuovi esempi, l'algoritmo stesso sia in grado di prevedere le risposte corrette [38]. L'apprendimento con supervisione può suddividersi in diverse sottocategorie. È necessario distinguere fra problemi di classificazione e problemi di regressione. Si parla di *Classificazione* quando le etichette delle classi sono valori discreti e non ordinati, previsti sulla base delle osservazioni compiute nel passato (campioni di apprendimento). Più in particolare, si parla di *Classificazione Binaria* quando l'insieme delle etichette delle classi ha natura binaria, altrimenti si parla di *Classificazione Multiclasse*. Ogni etichetta della classe presente nel dataset di apprendimento viene presa in considerazione per valutare le nuove istanze che non sono dotate di etichette.

#### 4.1.2 Reti Neurali Artificiali

Le Reti Neurali Artificiali, spesso chiamate semplicemente "Reti Neurali" (NN), sono dei sistemi composti da tante unità di base, chiamate neuroni, interconnesse tra di loro così da simulare il funzionamento dei neuroni nel cervello umano. Le reti neurali presentano diversi livelli, ciascuno dei quali possiede i propri pesi. Su ogni livello può esserci un numero di unità diverso, come mostrato in figura 4.1, e il numero di connessioni è stabilito dal numero di unità presenti fra due livelli adiacenti [38].

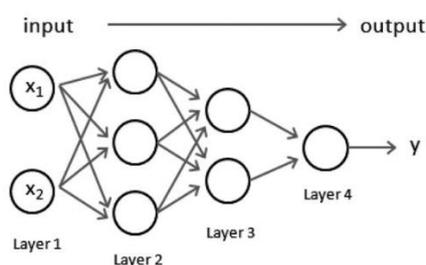


Fig. 4.1 - Un esempio di architettura di una rete neurale.[38]



Le reti neurali ricevono segnali esterni nel cosiddetto *input layer*, che vengono elaborati dagli strati intermedi, definiti *hidden layers*, per ottenere l'output desiderato.

I primi modelli di rete neurale, basati sul perceptrone, erano classificatori binari in grado di fornire come output un valore numerico tra due possibili. L'output del singolo perceptrone assume valore unitario quando la combinazione degli input e dei pesi supera una certa soglia. Più recentemente, per risolvere i problemi del perceptrone, si decide di associare una funzione di attivazione alla singola unità della rete neurale. In questo modo, gli output della rete passano da un intervallo discreto ad uno continuo compreso tra 0 e 1.

## 4.2 Reti Neurali Convoluzionali

Attualmente, le Reti Neurali Convoluzionali (CNN, ConvNet) sono tra le tipologie di reti più utilizzate nel deep learning. Si tratta di reti basate sull'apprendimento con supervisione, particolarmente adatte per il riconoscimento di oggetti nelle immagini.

L'idea base delle reti neurali convolutive si basa sul fatto di costruire più livelli di rilevatori di caratteristiche, per considerare la disposizione spaziale dei pixel in un'immagine di input.[36]

Si possono distinguere diverse tipologie di CNN, in base al compito per cui sono concepite:

- **Image Classification:** Il problema più semplice che è possibile risolvere con una CNN è la classificazione, la quale consiste determinare la classe a cui appartiene l'oggetto. Si usa spesso anche il termine riconoscimento.<sup>13</sup>
- **Image Detection:** Permette di localizzare un oggetto nell'immagine e determinarne la classe di appartenenza.
- **Instance Segmentation:** Permette di individuare e delineare nell'immagine ogni oggetto distinto appartenente ad una specifica classe.
- **Image Captioning:** Consiste nel generale una descrizione testuale di un'immagine.
- **Image Generation:** Permettono di generare nuove immagini a partire da altre immagini.

## 4.2.1 Componenti di una Rete Neurale Convolutionale

Le Reti Neurali Convolutionali sono composte dall'alternanza e ripetizione di quattro differenti moduli: Convoluzione, Attivazione, Pooling e Connessione totale. Il livello di input della rete neurale convoluzionale è direttamente collegato ai pixel dell'immagine, mentre gli ultimi livelli sono generalmente moduli di Connessione totale. Per creare una rete neurale convolutiva profonda, impiliamo più livelli di convoluzione e pooling, per poi connetterli agli strati di Connessione Totale, i quali consentono di effettuare il compito di classificazione.

Ogni singolo strato di convoluzione o di Connessione Totale è sempre seguito da uno strato di Attivazione. Strati di Convoluzione e di pooling sono alternati tra loro perché permettono di ridurre le caratteristiche dell'immagine. Queste fasi, partendo dall'immagine di input, ci permettono di estrarre e distinguere le *features*, cioè le caratteristiche invarianti di un gruppo di immagini omogenee. Le *features* vengono poi utilizzate per classificare immagini inedite. Sulla base della correttezza del risultato e di un algoritmo di retropropagazione, i valori dei pesi associati ai neuroni si modificano. In questo modo, la rete è in grado di imparare quali solo le *features* più importanti ai fini della distinzione tra le classi nel dataset di training. In figura 4.2 è mostrata una generica architettura di reti CNN.

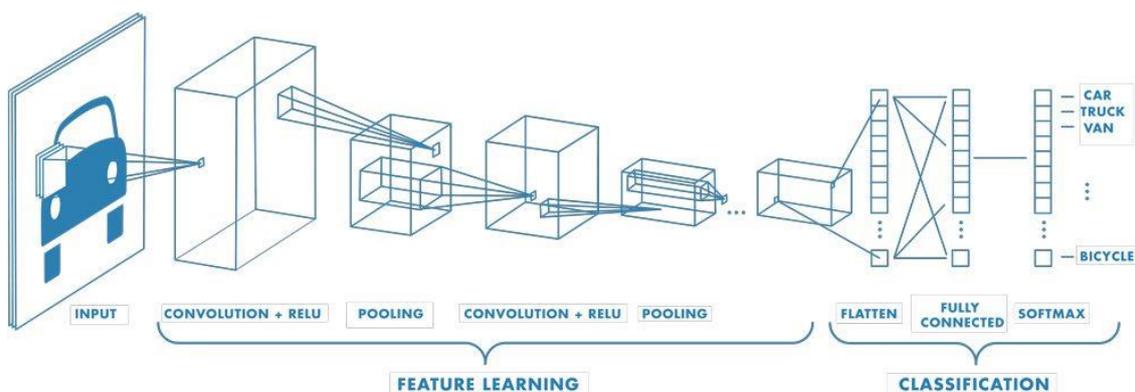


Fig. 4.2 – Architettura generale di una rete neurale convoluzionale.

Dal punto di vista dell'architettura della rete, ogni neurone è connesso solo ai neuroni del livello immediatamente precedente. I neuroni appartenenti allo stesso livello processano, secondo le medesime modalità, diverse porzioni della stessa immagine di input.

### 4.2.1.1 Moduli di Convoluzione

Gli strati Convolutionali della rete applicano dei filtri all'immagine di input, che permettono di evidenziare, trasformare o far scomparire particolari caratteristiche dell'immagine stessa. Tali caratteristiche, definite spesso col termine *features*, possono corrispondere a pattern più o meno semplici in funzione del filtro

applicato e a seconda della profondità alla quale si trova lo strato convoluzionale stesso. Tali moduli consentono di specializzare determinati neuroni al riconoscimento di particolari forme o features nell'immagine.

La profondità del filtro che si applica all'immagine nell'operazione di convoluzione coincide con il numero di kernel di cui è composto il filtro stesso. Tale profondità coincide con la profondità dell'immagine di input, la quale rappresenta il numero delle mappe delle caratteristiche di input (*Feature Maps*). Ogni *Feature Map* del volume di output può essere vista come il risultato di uno specifico filtraggio dell'input.<sup>3</sup>

Per immagini a colori, aventi quindi tre canali, il filtro è composto da tre *kernels*. Il *kernel*, detto anche matrice di convoluzione, è una matrice bidimensionale che contiene dei pesi e che si applica al singolo canale dell'immagine di input.

Il *kernel* presenta una dimensione minore a quella dell'immagine di input su cui è applicata, generalmente dispari. Definito il *kernel*, è possibile eseguire l'operazione di convoluzione sulla matrice bidimensionale che rappresenta l'immagine di input. In figura 4.3 è mostrato un esempio di convoluzione con kernel 3x3 applicata su un singolo canale dell'immagine, di dimensione 5x5.

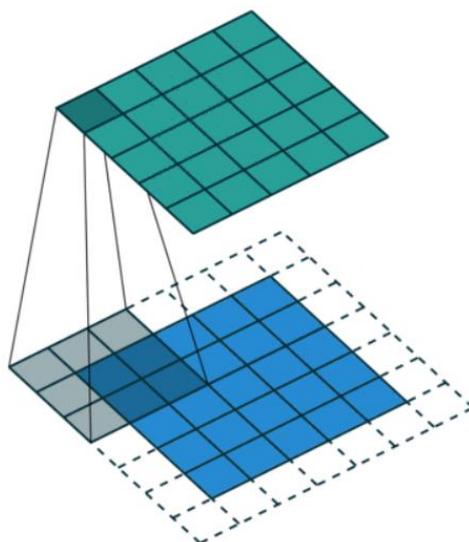


Fig. 4.3 – Convoluzione di un singolo canale di un'immagine 5x5 con un filtro 3x3. L'output si è ottenuto con stride e zero-padding pari ad 1<sup>2</sup>.

Per ogni particolare posizione che la matrice kernel assume sulla matrice di input, è possibile calcolare il valore scalare del pixel della matrice di output in corrispondenza del centro della matrice kernel. Dal punto di vista matematico, tale valore scalare si calcola come somma dei prodotti di ciascun elemento della matrice kernel con il corrispondente pixel sovrapposto della matrice di input.

Il passo con cui il kernel si sposta nel volume di input viene definito *Stride*.

Il *Padding* consiste nell'aggiunta di pixel in corrispondenza dei bordi dell'immagine di input. Nel caso del *zero-padding* si aggiungono pixel aventi valore nullo, al fine di ottenere dimensione del volume di output pari a quella di



input. Senza l'uso del *padding*, i pixel sui bordi dell'immagine non saranno mai al centro del *kernel*, dato che il kernel non può estendersi oltre.

La dimensione orizzontale e verticale del kernel, il suo stride orizzontale e verticale ed il *Padding* sono tutti iperparametri del modello. Il valore di tali iperparametri, precedentemente definiti, deve essere definito a priori, in quanto assieme consentono di controllare la dimensione del volume di output dell'operazione di convoluzione. Il numero di kernel utilizzati per l'operazione di convoluzione definisce la profondità del volume di output e, quindi, rappresenta un ulteriore iperparametro del modello.

Il risultato è che ogni canale dell'immagine di input viene separato in tante piastrelle semi sovrapposte, ognuna delle quali mantiene la stessa posizione che aveva nell'immagine originale. La perdita di informazione rispetto all'immagine di input è minima. Ho quindi un insieme di piastrelle per ogni canale, ognuna delle quali è rappresentata da un array numerico bidimensionale di dimensione pari a quella del kernel. Ogni piastrella viene trasformato in un valore scalare attraverso l'operazione di convoluzione. Si ottiene una matrice bidimensionale per ogni singolo canale, le quali vengono poi sommate assieme. Successivamente, sommando un termine scalare detto *bias*, si ottiene il volume di output.

#### 4.2.1.2 Moduli di Attivazione

Tale modulo si trova generalmente a valle di un modulo di convoluzione e applica una funzione di attivazione ad ogni elemento appartenente al volume in input.

Le funzioni di attivazione applicano una trasformazione non lineare allo strato (*layer*) di output e decidono se un neurone debba essere attivato o no.

Una rete neurale, in assenza di moduli di attivazione, diventerebbe un modello di regressione lineare, inadatto alla risoluzione di compiti complessi. Conseguentemente, le funzioni di attivazione sono necessarie ai fini dell'apprendimento della rete, in particolar modo nelle reti di tipo convoluzionale, le quali sfruttano la retropropagazione per questo scopo. Le funzioni di attivazione più popolari sono la funzione Gradino, Sigmoidea, TanH, ReLU, Softmax.

- **Sigmoide:** La funzione Sigmoide (Sigmoid) è spesso usata all'ultimo layer di problemi di classificazioni binari. La funzione, rappresentata in figura 4.4, assicura che determinati segnali rimangano all'interno di specifici intervalli fissati ed è definita dalla relazione:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

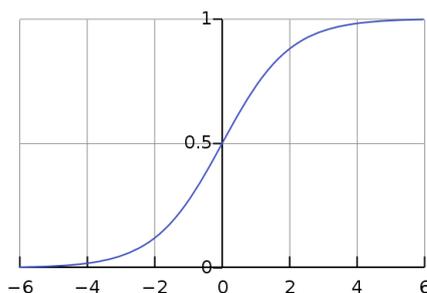


Fig. 4.4 – Rappresentazione nel piano cartesiano della funzione Sigmoidea<sup>22</sup>.

La funzione è stata progressivamente abbandonata a causa di alcune problematiche che provoca durante il processo di retropropagazione. Valori di input della funzione Sigmoide agli estremi dell'intervallo possono determinare un gradiente locale prossimo allo zero, conducendo al problema della scomparsa del gradiente.

- **ReLU:** La funzione ReLU(rectified linear unit) viene spesso utilizzata in sostituzione alla Sigmoide per evitare il problema della scomparsa del gradiente nelle reti neurali profonde. ReLU accetta qualsiasi valore reale come input, fornendo output non nullo solo quando l'input è maggiore di zero. L'andamento della funzione è mostrato in figura 4.5.

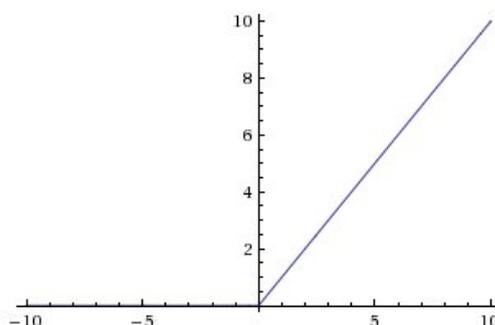


Fig. 4.5 – Rappresentazione nel piano cartesiano della funzione della funzione ReLU<sup>23</sup>.

- **Softmax:** La funzione Softmax viene utilizzata nei problemi di classificazione multiclasse. Accetta come input valori indipendenti tra loro e fornisce probabilità come output, la cui somma fornisce valore unitario. La funzione è espressa dalla seguente relazione:

$$f(y_i) = \frac{e^{y_i}}{\sum_j^K e^{y_j}}$$

in cui K è il numero di componenti del vettore y e  $y_i$  rappresenta la sua i-esima componente.

Se usata come ultimo strato di una rete convoluzionale, per avere la predizione è sufficiente scegliere la classe associata al valore di probabilità maggiore. La Softmax viene spesso combinata con la funzione



di perdita ad entropia incrociata, allo scopo di misurare le performance del modello di classificazione. La funzione di perdita aumenta al divergere dell'output della Softmax dall'etichetta reale.

#### 4.2.1.3 Moduli di Pooling

Il modulo di Pooling permette di intensificare le *features* precedentemente individuate nel modulo di convoluzione, mediante una condensazione dell'informazione contenuta nell'immagine, definita anche *downsampling*.

Il Pooling permette da un lato di ridurre la dimensione dell'immagine, mediante aggregazione del valore assunto dai pixel, e dall'altro di rendere il riconoscimento dell'oggetto indipendente da qualsiasi rotazione o distorsione.

In uno strato di pooling il filtro si muove all'interno dell'immagine con un certo passo, definito *stride*, senza sovrapposizione tra le posizioni adiacenti da esso assunte. Il volume di output avrà stessa profondità di quello di input, mentre altezza e larghezza variano alla stessa maniera della fase di convoluzione.

Conseguentemente, il modulo di pooling genera mappe delle caratteristiche (*Feature maps*) di dimensione inferiore rispetto a quelle del volume di input, lasciandole invariate in numero. Il filtro del *pooling*, a differenza di quello convolutivo, non ha pesi da apprendere.

In base alla modalità con cui lo strato di *Pooling* esegue l'aggregazione dei pixel, possiamo distinguere tre principali tipologie di *Pooling*: *Max Pooling*, *Average Pooling* e *Min Pooling*.

- Il *Max Pooling* sceglie il pixel avente valore maggiore nella regione occupata dal filtro. La scelta del pixel avente intensità di colore maggiore risulta particolarmente utile nel caso di immagini aventi sfondi più scuri dell'oggetto da individuare.
- L' *Average Pooling* calcola la media dei valori assunti dai pixel nella regione occupata dal filtro.
- Il *Min Pooling* sceglie il pixel con valore minore, in maniera opposta rispetto al *Max Pooling*. Rende l'immagine meno definita, rendendo le *features* più nitide più difficili da individuare.

Il Pooling consente di prevenire problemi di *overfitting*, evitando che la rete si specializzi troppo nel riconoscimento degli elementi di training senza essere in grado di riconoscere gli stessi in condizioni diverse.



#### 4.2.1.4 Moduli di Connessione Totale

I moduli di Connessione Totale, detti anche Fully-Connected, si trovano a valle della rete e l'ultimo di essi produce come output un vettore contenente i punteggi relativi al compito di classificazione per l'immagine trattata. Quest'ultimo modulo opera come un classificatore perceptrone multistrato (MLP). L'input di questi moduli corrisponde alle features imparate dalla rete negli strati di convoluzione precedenti, che vengono combinate in ogni nodo del modulo.

I pesi di questi moduli vengono modificati in fase di allenamento della rete.

### 4.3 Componenti della Rete Neurale

#### 4.3.1 Inizializzazione dei parametri del modello

L'inizializzazione consiste nella scelta dei valori iniziali dei pesi delle connessioni e dei *bias* dei neuroni della rete neurale che vengono modificati successivamente durante il training<sup>11</sup>. Una corretta inizializzazione consente una adeguata convergenza in fase di training.

Nelle reti neurali profonde gli output generati dai nodi assumono valori sempre più piccoli man mano che ci si sposta negli strati più profondi, fino a quantità quasi nulle. Conseguentemente, un'inizializzazione scorretta potrebbe portare il gradiente ad annullarsi durante la retropropagazione.

Uno dei migliori metodi per inizializzare i parametri di una rete neurale è mediante l'utilizzo dell'inizializzazione Xavier (2010). I pesi sono qui campionati a partire da una distribuzione gaussiana avente media nulla e deviazione standard pari a  $1/\sqrt{N}$ , in cui N è il numero di connessioni.

#### 4.3.2 Trasformazioni del dataset

Il caricamento e la preparazione dei dati di input risultano importanti per risolvere qualsiasi problema di machine learning.

Si può scegliere di utilizzare uno o più dataset preesistenti oppure di crearne uno con delle immagini che verranno poi tagliate e ridimensionate in base al tipo di input richiesto dal modello. Le principali trasformazioni che vengono applicate alle immagini sono la Normalizzazione e il Data Augmentation.



#### 4.3.2.1 Partizionamento del set di dati

L'insieme del dataset può essere partizionato nei sottoinsiemi di Addestramento (Training), Validazione (Validation) e Test in maniera randomica.

La prima partizione viene utilizzata per addestrare la rete, conferendogli la capacità di prevedere l'etichetta dei dati. Successivamente, la seconda partizione permette di valutare l'adattamento del modello al set di addestramento mentre si settano gli iperparametri, evitando il problema dell'overfitting. Infine, l'ultima partizione permette di valutare le prestazioni della rete, con gli iperparametri fissati. Vengono assegnati degli indici a tutti gli elementi appartenenti al dataset e successivamente suddivisi nei tre sottoinsiemi. Le etichette vengono partizionate allo stesso modo.

Il dataset di training viene a sua volta suddiviso in batch, che diamo in ordine randomico alla rete. La singola Epoca (*Epoch*) termina soltanto quando ogni dato viene dato una sola volta alla rete.

#### 4.3.2.2 Normalizzazione del Dataset

La normalizzazione è un'operazione di ridimensionamento dei dati, eseguita in fase di preelaborazione, per impedire che valori fuori scala possano influenzare col proprio peso il resto dei dati. La normalizzazione permette di rendere più efficiente l'addestramento, con la conseguenza di migliorare le predizioni della rete. Il termine Normalizzazione può riferirsi a due tecniche diverse: Normalizzazione e Standardizzazione.

- La Normalizzazione di un Dataset di immagini consiste in un cambiamento di scala del valore di intensità assunto dai pixel. Il valore di ogni pixel di ognuno dei tre canali RGB dell'immagine viene scalato dall'intervallo di numeri naturali [0, 255] all'intervallo di numeri reali [0, 1].
- La Standardizzazione di un Dataset di immagini consiste in un cambiamento di scala del valore di intensità assunto dai pixel in modo tale il che il valore medio sia nullo e la deviazione standard unitaria. Per effetto della normalizzazione ogni pixel di ogni canale dell'immagine viene sottoposto alla trasformazione di seguito riportata, scalando così media e deviazione standard del dataset:

$$z_i = \frac{x_i - \mu(x)}{\sigma(x)}$$



In cui  $\mu$  e  $\sigma$  rappresentano rispettivamente media e deviazione standard del vettore  $x$ , contenente i valori  $x_i$  che si vogliono standardizzare.

Per grossi dataset di immagini il processo di Normalizzazione, e quindi di calcolo di media e deviazione standard, non risulta possibile a causa dei limiti dimensionali della memoria della macchina. In questi casi, nonostante non siano equivalenti, è possibile calcolare media e deviazione standard di tutti i *mini-batch* e successivamente farne la media.

Nel caso di utilizzo di reti pre-allenate, la normalizzazione del dataset viene solitamente eseguita con i valori di media e deviazione standard del dataset del primo addestramento. Ciò è dovuto al fatto che soltanto una piccola porzione della rete ed il classificatore finale vengono riallenati. Infatti, i pesi della rete dopo l'addestramento sono corretti soltanto su dati normalizzati allo stesso modo.

Se la rete non risulta congelata e viene quindi riaddestrata da zero, allora è possibile eseguire la normalizzazione usando i parametri ricavati dal nuovo dataset.

#### 4.3.2.3 Image Data Augmentation

Il *Data Augmentation* è una tecnica che permette di generare nuovi elementi per l'addestramento a partire da quelli già disponibili.

Vengono create versioni trasformate delle immagini, appartenenti alla stessa classe. Le specifiche tecniche di Data Augmentation da utilizzare sono scelte in base al set di training stesso ed al dominio del problema.

Questa tecnica è particolarmente efficace nei problemi di classificazione di immagini, in quanto diverse condizioni di fattori ambientali, quali luminosità e contrasto, possono influenzare il modo con cui vengono apprese le *features* nel modello. Esempi di trasformazioni possono essere la traslazione, il ritaglio, la riflessione e la rotazione. Nonostante le CNN apprendano caratteristiche invarianti dalla posizione nell'immagine, il Data Augmentation può ulteriormente aiutarne l'apprendimento, incluso quello di caratteristiche invarianti da altre tipologie di trasformazioni.



### 4.3.3 Aggiornamento dei pesi

La fase di apprendimento consiste nel determinare il valore ottimo del set di parametri della rete, cioè dei pesi delle connessioni tra i vari strati della rete stessa. Il metodo di retropropagazione, definito *backpropagation*, è uno dei metodi di addestramento più diffusi. L'aggiornamento dei pesi dei vari livelli della rete avviene attraverso una propagazione all'indietro degli errori, in cui la differenza tra previsione di output e risultato atteso viene distribuita tra i vari strati. L'aggiornamento dei pesi avviene mediante la seguente relazione:

$$W_i = W_i - \alpha \nabla W_i$$

dove  $\nabla W$  è il gradiente del vettore dei pesi  $W_i$  alla  $i$ -esima iterazione e lo scalare  $\alpha$ , definito tasso di apprendimento, ne definisce il passo.

#### 4.3.3.1 Algoritmo di ottimizzazione

L'addestramento della rete è ripetuto più volte al fine di trovare la combinazione degli iperparametri del modello che fornisce le prestazioni migliori in termini di minimizzazione della funzione di perdita ed accuratezza del test.

Per trovare la soluzione che minimizza la funzione di perdita è necessario un algoritmo di ottimizzazione.

I metodi tradizionalmente utilizzati per l'aggiornamento dei pesi sono il metodo della discesa del gradiente stocastica, discesa batch e apprendimento mini-batch.

- Il metodo della discesa del gradiente stocastica (SGD) il gradiente viene calcolato su un singolo campione dal training set, selezionato in modo casuale ad ogni iterazione. Il frequente aggiornamento del modello allunga molto i tempi di training e si traduce in un segnale di gradiente rumoroso, che provoca oscillazioni dell'errore di modello lungo le epoche di training e rende la ricerca della soluzione meno incline ad incorrere in minimi locali.

Il valore del gradiente ci fornisce la direzione lungo la quale la superficie della funzione di costo è più ripida, come mostrato in figura 4.6.

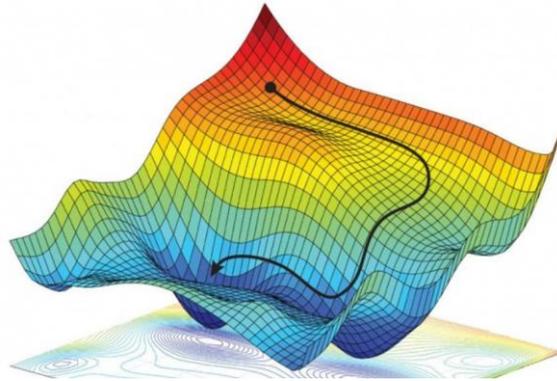


Fig. 4.6 – rappresentazione ideale del processo di ottimizzazione della funzione di costo, legato al raggiungimento di un minimo globale<sup>6</sup>.

- Il metodo della discesa del gradiente batch (BGD) esegue l'aggiornamento del modello (e quindi dei parametri) soltanto alla fine di ogni epoca di training, cioè dopo aver processato tutto il dataset di training. Presenta maggiore efficienza dal punto di vista computazionale ed un errore di gradiente più stabile. Spesso richiede la disponibilità in memoria dell'intero dataset e spesso la traiettoria del gradiente batch può convergere prematuramente in punti di minimo locale.
- Il metodo di apprendimento mini-batch consiste nel dividere il dataset di addestramento in sottoinsiemi di campioni, definiti batch, utilizzati ad ogni iterazione per calcolare il gradiente, l'errore di modello e aggiornarne i coefficienti. Il gradiente viene calcolato per ogni singolo batch. I principali vantaggi sono l'aggiornamento frequente dei pesi, che consente di raggiungere più rapidamente la convergenza, e la non necessità di avere in memoria tutti i dati di training.

La dimensione del lotto, definita *mini-batch size*, rappresenta un ulteriore iperparametro del modello. Per tale iperparametro si utilizzano spesso valori multipli dell'architettura computazionale della macchina su cui viene eseguito (32, 64, 128, 256, ecc.). Valori elevati del parametro consentono di avere una rapida convergenza al costo di una stima meno accurata dell'errore di gradiente. Per ottimizzare tale iperparametro occorre valutare come variano le curve di apprendimento dell'errore di validazione del modello ed il tempo di training con diversi valori. È possibile ottimizzare tale parametro, una volta fissati tutti gli altri iperparametri del modello. Successivamente, effettuata l'ottimizzazione degli iperparametri, occorre ri-ottimizzare batch size e learning rate.



Nel metodo BGD i parametri sono aggiornati aggiungendo il gradiente calcolato su una singola istanza del set di dati, mentre nel metodo SGD si utilizza il gradiente relativo all'intero set di dati<sup>5</sup>.

La metodologia mini-batch è un compromesso tra discesa del gradiente batch e discesa del gradiente stocastica, che inietta abbastanza rumore per ogni aggiornamento del gradiente, ottenendo al contempo una convergenza relativamente rapida<sup>5</sup>.

L'esigenza di variare il learning rate durante il processo, di migliorare la sensibilità ai minimi locali e le prestazioni in termini di velocità di convergenza, porta alla nascita di metodi di ottimizzazione più raffinati. Il metodo Adam (Adaptive Momentum Estimation) memorizza ad ogni iterazione oltre al gradiente, anche un momento del primo e secondo ordine della funzione gradiente. Nascono quindi i due iperparametri  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , che controllano di decadimento esponenziale dei momenti del primo e secondo ordine.

Tale metodo, a differenza dei precedenti, utilizza tassi di apprendimento adattivi individuali per diversi parametri, continuamente ricalcolati a partire dai valori storici del gradiente e dei suoi momenti, accumulati fino alla corrente iterazione. Un valore elevato del tasso di apprendimento  $\alpha$  determina un apprendimento iniziale più veloce. Non risulta quindi necessario definire un decadimento del tasso di apprendimento. Sperimentazioni su rete neurali convoluzionali profonde utilizzando l'ottimizzatore Adam ed i dataset *MNIST* e *CIFAR-10* dimostrano una evidente diminuzione dei costi computazionali di training rispetto ad altri ottimizzatori[38]. Gli autori del metodo Adam (Kingma e Ba, 2014) forniscono valori iniziali raccomandati di  $\alpha=0.001$ ,  $\beta_1=0.9$ ,  $\beta_2=0.999$  e  $\varepsilon=10^{-8}$  [39].

#### 4.3.3.2 Funzione di Perdita nei problemi di classificazione

La Funzione di Perdita (*Loss Function*) permette di misurare le performance del modello di classificazione. Il valore della funzione di perdita aumenta quando l'etichetta predetta dal classificatore diverge dall'etichetta reale.

Il tipo di Loss da utilizzare dipende strettamente dal tipo di problema di classificazione che si sta affrontando. In particolare, affinché la Loss possa essere correttamente calcolata, è necessario che le classi di output della rete appartengano ad una distribuzione di probabilità<sup>8</sup>. Per tale motivo è comune trovare una funzione di attivazione *Softmax* nella parte terminale della rete. Si possono individuare tre tipi di compiti di classificazione:

- **Classificazione Binaria:** La presenza di due classi di output esclusive rende necessario utilizzare la funzione di perdita di entropia incrociata binaria (BCE, Binary Cross-Entropy).

In un problema di classificazione binario, in cui si hanno solo due possibili output, nella parte terminale della rete neurale non si utilizza la funzione *Softmax* ma una Sigmoide, la quale fornisce un unico valore di probabilità, come mostrato in figura 4.7.

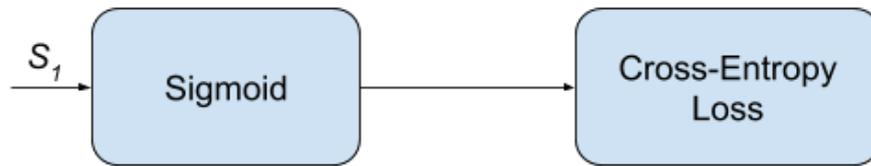


Fig. 4.7 - Rappresentazione della Binary Cross-Entropy Loss <sup>9</sup>.

In questo modo si codifica la probabilità della sola prima classe, mentre la seconda probabilità sarà il completamento all'unità. Tale normalizzazione a valore unitario della probabilità delle due classi è implicita nella formulazione dell'entropia incrociata binaria<sup>7</sup>, mostrata di seguito:

$$BCE = -t \log(z) - (1 - t) \log(1 - z)$$

In cui  $t$  è un valore appartenente all'intervallo  $[0,1]$  che rappresenta la probabilità della prima classe e  $z$  l'output della funzione di attivazione Sigmoide. Ad esempio, il framework *Pytorch* implementa due diverse tipologie di BCE. La prima, definita dalla stringa *nn.BCEWithLogitsLoss()*, integra al suo interno la funzione di attivazione sigmoide, non rendendo necessaria la sua presenza nella parte terminale della rete. La seconda, definita dalla stringa *nn.BCELoss()*, non incorpora una funzione di attivazione.

- Classificazione Multi-Classe:** Sono presenti più di due classi di output esclusive. Per tali problemi è spesso consigliato l'utilizzo della funzione di perdita di entropia incrociata (CE, Cross-Entropy). Un problema di classificazione multi-classe richiede solitamente una *Softmax* nell'ultimo strato della rete neurale, la quale permette di trasformare i valori *Raw* in probabilità. La sequenza è mostrata in figura 4.8.

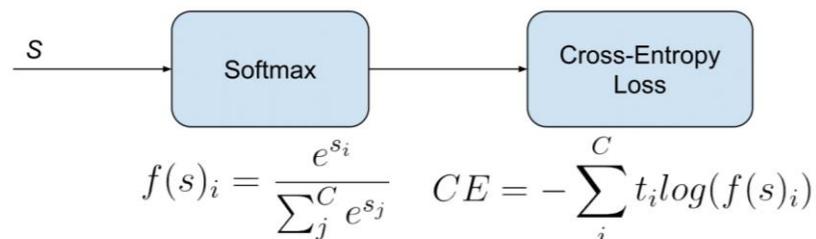


Fig. 4.8 - Rappresentazione sequenziale della *Softmax* e della Cross-Entropy Loss<sup>9</sup>.  $C$  è il numero delle classi e  $s_j$  il punteggio ottenuto dalla  $j$ -esima classe.



La *Categorical Cross-Entropy Loss* implementata nel framework Pytorch, definita dalla stringa `nn.BCEWithLogitsLoss()`, integra già al suo interno la funzione di attivazione *Softmax*. In tali casi, l'ultimo livello della rete neurale, composto dagli strati di connessione totale, non deve includere una *Softmax*, in quanto sarà la *Categorical Cross-Entropy Loss* stessa a trasformare gli output in probabilità. Conseguentemente, il vettore  $Y$  delle predizioni deve contenere valori *Raw*. Nel caso in cui si utilizza la *Categorical Cross-Entropy Loss* e le etichette delle classi sono in forma di codifica a caldo (One-Hot), allora solamente la classe positiva mantiene il suo termine nella funzione di perdita. Infatti, nel caso di codifica a caldo, il vettore  $Y$  delle predizioni ha un unico valore unitario e i restanti nulli. Quindi scartando gli elementi della sommatoria che sono nulli, la Loss assume tale forma<sup>9</sup>:

$$CCE = -\log \left( \frac{e^{s_p}}{\sum_j^C e^{s_j}} \right)$$

in cui  $s_p$  è il punteggio ottenuto dalla classe positiva,  $s_j$  il punteggio della  $j$ -esima classe e  $C$  il numero di classi di output. La funzione di perdita di entropia incrociata viene di solito utilizzata quando tutte le classi o categorie sono indipendenti tra loro: un oggetto non può appartenere contemporaneamente a due classi.

- **Classificazione multi-etichetta:** Sono presenti più classi di output non esclusive. Ogni oggetto può appartenere a più classi contemporaneamente e, quindi, può essere provvisto di più etichette. Se si considera il classificatore multi-etichetta come un classificatore binario separato, allora è possibile utilizzare la funzione di perdita di entropia incrociata binaria. Ogni classificatore binario viene addestrato in modo indipendente<sup>26</sup>. Il motivo per cui si utilizza la BCE nei problemi multi-label risiede nel fatto che la perdita calcolata per ogni componente del vettore di output non è influenzata dal valore delle altre componenti.



### 4.3.3.3 Regolarizzazione

La regolarizzazione è una tecnica che consiste nell'aggiungere un termine di penalità alla funzione di perdita, mediante l'uso di un termine definito "decadimento del peso". Come conseguenza, ogni epoca della fase di addestramento oltre a minimizzare la funzione *Loss* vera e propria, minimizzerà anche i pesi del modello. La regolarizzazione si utilizza principalmente per ridurre il rischio di *overfitting* del set di addestramento e per mantenere piccoli i parametri (pesi) del modello. In particolare, impedisce ai pesi del modello di crescere senza controllo, evitando il problema dell'esplosione del gradiente. È particolarmente importante nei casi in cui il set di addestramento non ha grandi dimensioni rispetto alla capacità del modello<sup>7</sup>. Ciò consente di migliorare la capacità di generalizzazione di quanto appreso dal modello a nuovi set di dati, riducendo gli effetti del sovrallenamento. La tecnica più diffusa è la regolarizzazione L2, nota anche come *weight decay*, in cui il termine di penalità è costituito dalla somma dei quadrati di tutti i pesi della rete (norma del vettore dei pesi).

L'iperparametro  $\lambda$  regola la forza della regolarizzazione e moltiplica la norma del vettore dei pesi. Un valore nullo di  $\lambda$  ripristina la funzione di perdita originale, mentre un valore elevato vincola considerevolmente la dimensione dei pesi.

Nel caso di funzione di perdita ad entropia incrociata, l'equazione generale è di seguito indicata:

$$J_{Tot} = J_{Cross-Entropy} + J_{Reg}$$

in cui la funzione di regolarizzazione è espressa dalla seguente equazione<sup>7</sup>:

$$J_{Reg} = \frac{1}{2} \lambda \sum_i w_i^2$$

L'effetto della regolarizzazione è un incremento dell' errore sul training set e diminuzione di quello sul test set. In particolare, un valore elevato del *weight decay* non permette al modello di convergere verso una soluzione, mentre un valore troppo basso può allungare il numero di epoche necessarie<sup>27</sup>.

Il gradiente della funzione  $J_{Tot}$  calcolato rispetto ad uno dei parametri del modello coincide con la somma del gradiente dei due termini  $J_{Cross-Entropy}$  e  $J_{Reg}$ . Quest'ultimo assume la forma seguente<sup>28</sup>:

$$\frac{\partial J_{Reg}}{\partial w_k} = \frac{\partial}{\partial w_k} \left( \frac{1}{2} \lambda \sum_i w_i^2 \right) = \lambda w_k$$

In cui  $w_k$  è un peso del modello.

#### 4.3.3.4 Dropout

Il Dropout è una forma di regolarizzazione, in quanto limita un eccessivo adattamento della rete ai dati durante l'addestramento. Lo spegnimento casuale di alcuni neuroni determina l'annullamento delle loro connessioni, sia quelle in ingresso che quelle in uscita (figura 4.9).

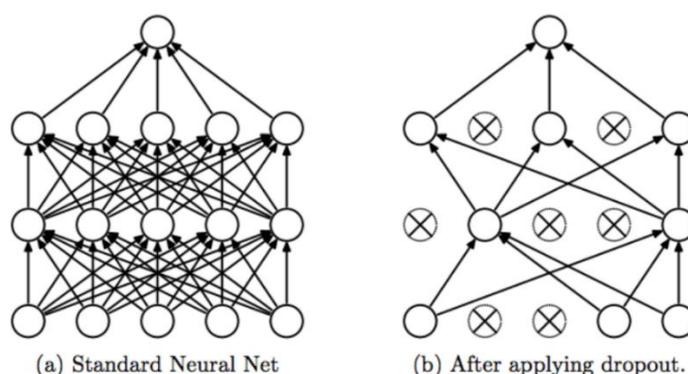


Fig. 4.9 – Rete neurale prima (sinistra) e dopo (destra) l'applicazione del dropout. Alcuni nodi sono stati rimossi casualmente dal modello[40].

Lo spegnimento casuale e temporaneo di alcuni neuroni non permette loro di apprendere informazioni, facendo ricadere sugli altri neuroni attivi l'onere di apprendere e di minimizzare la funzione di perdita<sup>15</sup>.

Il Dropout consiste nell'addestrare separatamente più classificatori diversi, per poi essere utilizzati assieme nella fase di test, calcolando una media tra le loro risposte<sup>14</sup>. Ogni iterazione dell'addestramento produce una nuova rete ridotta del modello di partenza, che viene addestrata attraverso la normale retropropagazione. La combinazione dei classificatori, formati in maniera indipendente tra loro, consente di produrre un classificatore più forte.

Il dropout consente spesso di diminuire il *Test Loss* ed evitare che esso diverga rispetto al *Training Loss*, determinando una diminuzione dell'errore di generalizzazione del modello. Nonostante con il Dropout si ottengano accuratze di training più basse rispetto a modelli non regolarizzati, rendendo necessarie più epoche per completare l'addestramento, l'accuratezza di validazione risulta invece migliorata.



### 4.3.4 Ottimizzazione delle prestazioni del modello

I valori standard dei parametri del modello, spesso consigliati in articoli scientifici e librerie software, non sono ottimali per ogni specifico problema di machine learning. La ricerca dei loro valori ottimali, per cui le prestazioni del modello sono massimizzate, risulta complessa, anche a causa della loro interazione reciproca.

#### 4.3.4.1 Curve di Apprendimento e di Convalida

Le prestazioni del modello della rete neurale possono essere valutate ad ogni step della fase di addestramento. La curva di apprendimento viene calcolata con il dataset di addestramento e consente di valutare la bontà di addestramento del modello. La curva di convalida viene calcolata con il set di validazione e consente di valutare la capacità del modello di generalizzare. Le due curve vengono rappresentate in relazione alla funzione di perdita, la cui minimizzazione è utilizzata per ottimizzare i parametri del modello. A partire da valutazioni su *Training Loss* e *Validation Loss* è possibile diagnosticare problemi di *underfitting*, *overfitting* e non rappresentatività del Dataset.

- **Underfitting:** Una curva di apprendimento piatta, o con valori rumorosi ed elevati di Loss, indica un *Underfitting*. Qui, il modello risulta sottodimensionato rispetto alla complessità dataset oppure non ci sono elementi a sufficienza tali da rendere i pattern esistenti del modello dei segnali forti. Altro caso di *Underfitting* si ha quando la training loss continua a decrescere anche al termine del training. Si ha *underfitting* anche quando la curva di addestramento, e quindi il training loss, è di molto inferiore alla curva di validazione. Viceversa, si ha *overfitting* quando si verifica l'esatto opposto.
- **Overfitting:** Si verifica quando la *Training Loss* e *Validation Loss* divergono oppure quando la prima decresce senza mai stabilizzarsi mentre la seconda si stabilizza o cresce. In tale situazione il modello è troppo complesso per il compito ed occorre quindi diminuirne la capacità oppure aumentare la regolarizzazione.
- **Non rappresentatività del dataset di addestramento:** Si verifica quando la *Training Loss* e *Validation Loss* divergono, eventualmente mostrando lievi miglioramenti lungo le epoche. Si verifica quando il dataset di addestramento non fornisce abbastanza informazioni per l'apprendimento del task relativamente al set di validazione utilizzato per valutarlo.



- Non rappresentatività del dataset di validazione: Si verifica quando la curva di *Validation Loss* mostra poco o nessun miglioramento e risulta oscillante intorno alla curva di *Training Loss*, che invece mostra un buon andamento. Tale problema si verifica anche quando si ha curva di validazione al di sotto della curva di training, causa di un dataset di validazione troppo facile da predire rispetto a quello di *training*.

Le soluzioni da adottare sono varie e spesso iterative. Si può aumentare o ridurre la capacità del modello, regolarizzazione, *dropout* e *learning rate* oppure aggiungere dati al set di validazione.

### 4.3.5 Valutazione delle prestazioni del modello

La scelta di una corretta modalità di valutazione delle prestazioni risulta fondamentale per scegliere il modello più adatto al particolare compito da svolgere. Nessun modello di classificazione può considerarsi superiore agli altri indipendentemente dal compito da svolgere. Risulta quindi necessario un confronto tra modelli differenti per poter selezionare il migliore in base al compito da svolgere, basandoci su specifiche metriche di valutazione.

Non sempre un miglioramento in termini di *Training Loss* e *Validation Loss* si trasforma in miglioramento della accuratezza di validazione. Finché i miglioramenti in termini di funzione di perdita non consentono la corretta classificazione dell'immagine, non ci sono miglioramenti in termini di accuratezza, se tali stime rimangono al di sotto del valore di soglia.

#### 4.3.5.1 Matrice di Confusione

La matrice di confusione è una matrice quadrata, di dimensione pari al numero di classi di output, che rappresenta le prestazioni di un algoritmo di apprendimento tramite il confronto delle etichette delle classi vere e previste.<sup>1</sup> Presenta lungo la diagonale principale le predizioni corrette effettuate dal classificatore per ogni classe, mentre fuori diagonale i falsi positivi e falsi negativi. Ne consegue che in casi ideali la matrice di confusione è diagonale. In Figura 4.10 viene rappresentata una matrice 2x2, relativa ad una classificazione binaria.

		Classe prevista	
		P	N
Classe effettiva	P	Veri positivi (TP)	Falsi negativi (FN)
	N	Falsi positivi (FP)	Veri negativi (TN)

Fig. 4.10 – Schematizzazione di una matrice di confusione per un classificatore binario.



#### 4.3.5.2 Accuratezza della previsione

L'accuratezza viene utilizzata per valutare le prestazioni del modello della rete neurale ad ogni step della fase di addestramento. In problemi di classificazione le metriche più utilizzate sono Accuratezza, Precisione (Precision) e Recupero (Recall).

- **Accuratezza:** Nel caso di problemi di classificazione, l'accuratezza è la percentuale di istanze classificate correttamente rispetto al totale. L'accuratezza viene calcolata tramite la relazione seguente:

$$\text{Accuratezza} = \frac{\text{previsioni corrette}}{\text{previsioni totali}} = \frac{TP + FN}{FP + FN + TP + TN}$$

in cui TP, FN, FP e TN sono rispettivamente i veri positivi, falsi negativi, falsi positivi e veri negativi. In alternativa all'accuratezza, è possibile utilizzare la Precision e il Recall.

- **Precision:** Rappresenta il numero di oggetti etichettati correttamente come appartenenti alla classe rispetto al numero totale di elementi etichettati come appartenenti alla medesima classe. La precisione per una classe è definita dalla seguente relazione:

$$\text{Precisione} = \frac{TP}{FP + TP}$$

Un valore unitario di precisione per una data classe significa che ogni istanza etichettata come appartenente a tale classe, vi appartiene davvero. Tale valore non dice nulla sugli elementi della stessa classe che non sono stati etichettati correttamente<sup>29</sup>.

- **Recall:** Rappresenta il numero di veri positivi rispetto al numero totale di elementi che appartengono alla classe. Il *Recall* per una classe è definita dalla seguente relazione:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{FN + TP}$$

Un valore unitario di *Recall* implica che, per una certa classe, tutte le istanze hanno etichetta predetta coincidente con l'etichetta reale.

- **F1-Score:** Fornisce un punteggio unico, dato dalla media armonica di *Precision* e *Recall*. L' F1-Score è espresso dalla seguente relazione:



$$F1Score = \frac{2}{\frac{1}{p} + \frac{1}{r}} = 2 \frac{p r}{p + r}$$

In cui p e r sono *precision* e *recall*.

### 4.3.6 Training della rete

L'addestramento di modelli complessi su dataset di grandi dimensioni richiede elevate potenze computazionali [41]. La disponibilità di una GPU è fondamentale per contenere i tempi di *training*.

Ciò nonostante, l'addestramento può richiedere anche giorni di tempo macchina, soprattutto se la dimensione dei batch utilizzati è elevata.

Per ridurre i tempi di Training è possibile sfruttare tecniche di Transfer Learning.

#### 4.3.6.1 Metodi per ridurre i tempi di training: Transfer Learning

Nel Transfer Learning, una rete neurale, addestrata con un certo set di dati per un compito specifico, viene riaddestrata per un nuovo compito mediante un nuovo set di dati. Tale processo ha successo quando le caratteristiche imparate della rete per il primo compito sono generiche, cioè estendibili anche al nuovo compito<sup>12</sup>.

La rete pre-addestrata, che ha già appreso un esteso set di features nella prima fase di addestramento, viene riaddestrata per riconoscere features più specifiche relative al nuovo Dataset. I primi strati di una rete servono a identificare caratteristiche generiche, comuni a tutte le immagini. Gli strati più profondi catturano caratteristiche specifiche del set di dati utilizzato. Conseguentemente, vengono modificati soltanto i pesi dei livelli più profondi della rete, in modo da specializzarsi sul nuovo compito, mantenendo inalterati i restanti.

Tale tecnica viene utilizzata anche nei casi in cui non è disponibile un dataset di dimensioni sufficienti per il compito voluto. La tecnica di Transfer Learning più utilizzata è il Fine-tuning. Le principali tipologie di transfer learning sono di seguito elencate:

- **Fine-Tuning:** consiste nell'utilizzare una rete pre-addestrata, cioè addestrata su un problema simile a quello qui considerato. Si utilizzano i valori dei pesi della rete già addestrata (*pre-trained*), tranne che per gli ultimi livelli, in cui sono randomici. Il livello di output viene rimpiazzato con un nuovo livello che presenta classi di output pari a quelle richieste dal problema qui considerato. Vengono quindi addestrati sia gli ultimi



livelli della rete pre-addestrata che il classificatore finale aggiunto, mentre i restanti livelli della rete sono congelati. L'addestramento di una rete di questo tipo consiste quindi in poche interazioni, necessarie per ottimizzare la rete *pre-trained* alle caratteristiche del nuovo dataset.

- **Feature Extraction:** Consiste nell'utilizzare una rete pre-addestrata per un problema simile a quello considerato. Viene utilizzato per estrarre le caratteristiche significative dai nuovi dati, sfruttando le mappe delle caratteristiche apprese in precedenza con il dataset di origine. Viene addestrato soltanto il classificatore finale, che viene aggiunto nella parte terminale della rete pre-addestrata.

Addestrata la rete, l'operazione di classificazione della singola immagine richiede tempi dell'ordine dei secondi.

#### 4.3.6.2 Reti pre-addestrate per identificazione di fessure

Numerosi studi hanno permesso di valutare le performance di reti pre-addestrate per compiti di identificazione delle fessure su superfici di calcestruzzo.

Nello studio [17]41 si dimostra che con l'utilizzo di reti CNN pre-addestrate è possibile ottenere punteggi di accuratezza superiori al 90%, già dalla prima epoca di addestramento e per compiti di classificazione di fessure. Le reti CNN preaddestrate con il dataset *ImageNet*, tra cui VGG[22], GoogleNet [18]42 e ResNet[21]43, mostrano punteggi considerevoli. Nello studio è stata inoltre esaminata l'influenza della dimensione del set di dati di addestramento, numero di livelli convoluzionali del modello e numero di epoche di addestramento sui valori di accuratezza ottenuti.

Le reti *ConvNet* preaddestrate, grazie al fatto che non richiedono grossi dataset e forniscono rapida convergenza della soluzione, costituiscono un'opzione importante per l'implementazione di CNN per compiti di didentificazione delle fessure. A titolo di esempio sono mostrate in tab X i tempi di addestramento per singola epoca per alcuni modelli pre-addestrati analizzati dallo studio[42].

Tab. 4.1 – Confronto del tempo di addestramento per singola epoca per modelli di CNN diffusi, con dataset composto da ventottomila elementi[42].

28K dataset   per Epoch	Training Time (s)
AlexNet	133
VGG16	2827
VGG19	2943
GoogleNet	1227
ResNet50	1666
ResNet101	2447
ResNet152	3789



Le reti pre-addestrate hanno un'elevata applicabilità al rilevamento delle crepe nonostante siano addestrate su dataset completamente diversi, grazie alle feature di basso livello che i dataset hanno in comune.

Inoltre, il basso numero di campioni di addestramento richiesti, la rapida convergenza della soluzione e le elevate accuratezze ottenibili, rendono le reti pre-addestrate un'opzione preferenziale rispetto a reti tradizionali.

#### **4.3.7 Stato dell'arte delle Reti Neurali Convolutionali**

In questo paragrafo saranno trattate famiglie di reti convolutive ed i relativi modelli progettati negli ultimi tempi ed ancora oggi utilizzati. In particolare, si farà riferimento a reti convolutive concepite per compiti di classificazione e segmentazione dell'immagine. Con il termine modello si intende una particolare architettura che appartiene ad una determinata famiglia di reti.

Le CNN sono state proposte per la prima volta da Fukushima nel 1988 e sviluppate nel corso degli anni fino a diventare le migliori tipologie di strutture per processare immagini 2D e 3D. Le prime implementazioni software risalgono al 2010, a causa della limitata capacità di calcolo dei computer.

Tra le ConvNet più conosciute figurano AlexNet, VGG-Net, GoogLeNet, ResNet e EfficientNet.

##### **4.3.7.1 GoogLeNet**

GoogLeNet[43] è una rete ConvNet profonda realizzata per compiti di classificazione delle immagini e il rilevamento di oggetti, sviluppata da un gruppo di ricercatori di Google. GoogLeNet vinse nel 2014 il ILSVRC<sup>30</sup>. L'ILSVRC è un evento annuale in cui vengono valutati algoritmi per il rilevamento di oggetti e la classificazione delle immagini su larga scala.

L'architettura di GoogLeNet consiste in 27 strati, di cui 5 di pooling, ed è basata su speciali moduli, definiti Inception. Il modulo Inception permette di scegliere tra filtri convolutivi con kernel di diverse dimensioni, tra cui 1x1, 3x3, 5x5. L'introduzione di tale blocco permise una riduzione del numero di parametri della rete e dei problemi di overfitting.

I nove blocchi Inception presenti in GoogLeNet sono intervallati da blocchi di Max Pooling, necessari per ridurre la dimensionalità dell'immagine. La riduzione della dimensione di input dei moduli di Inception permette di ridurre i costi computazionali di addestramento della rete. L'ultimo modulo Inception è seguito da moduli di Average Pooling, dropout, Fully-Connected e Softmax. Questa struttura viene anche chiamata Inception V1.



Negli anni successivi gli stessi ricercatori proposero versioni migliorate della GoogLeNet, a partire da Inception V2[19] fino ad Inception V4[45]. In particolare, nel modello Inception V2 i filtri convoluzionali di dimensioni 5x5 vengono sostituiti con una combinazione di filtri di dimensione 3x3, così da ridurre ulteriormente i costi computazionali dei blocchi Inception.

#### 4.3.7.2 ResNet

ResNet[44] è una rete neurale convoluzionale profonda composta da un numero variabile strati. È la prima rete residuale mai realizzata, famosa per aver introdotto l'utilizzo della tecnica delle *skip connections*. ResNet vinse nel 2015 il ILSVRC. La struttura di ResNet prevede un'organizzazione in blocchi, definiti residuali, in cui il processo di retropropagazione del gradiente consente di raggiungere i nodi iniziali efficacemente saltando quelli intermedi. Ciò consente di evitare un peggioramento delle performance della rete all'aumentare della loro profondità. La ResNet risolve il problema dell'annullamento del gradiente, che rendeva gli errori durante la retropropagazione talmente piccoli da non permettere alla rete di apprendere. In base al numero di blocchi residui impilati si ottengono differenti reti residuali, tra cui le architetture ResNet34, ResNet50, ResNet101 e ResNet152.

#### 4.3.7.3 EfficientNet

EfficientNet è una rete convolutiva nata con lo scopo di fornire elevata accuratezza pur mantenendo un'elevata efficienza in termini di tempi di numero di parametri. La famiglia EfficientNet si ottiene a partire da una rete convolutiva di base, chiamata EfficientNet B0, la cui struttura di base è mostrata in tabella 4.2. L'intera famiglia di reti EfficientNet è ottenuta dagli autori attraverso un metodo combinato di modificazione di scala da loro ideato. Profondità, numero di canali della rete e risoluzione di input sono scalati uniformemente dalla EfficientNet B0 di base per generare le reti EfficientNets da B1 a B7.

Tab. 4.2 – Struttura di EfficientNet B0 – ogni colonna riporta: numero di strati da cui è composto l' i-esimo blocco, risoluzione di input, numero di canali di output e dimensione del filtro convoluzionale[46].

Stage $i$	Operator $\mathcal{F}_i$	Resolution $\hat{H}_i \times \hat{W}_i$	#Channels $\hat{C}_i$	#Layers $\hat{L}_i$
1	Conv3x3	224 × 224	32	1
2	MBCConv1, k3x3	112 × 112	16	1
3	MBCConv6, k3x3	112 × 112	24	2
4	MBCConv6, k5x5	56 × 56	40	2
5	MBCConv6, k3x3	28 × 28	80	3
6	MBCConv6, k5x5	14 × 14	112	3
7	MBCConv6, k5x5	14 × 14	192	4
8	MBCConv6, k3x3	7 × 7	320	1
9	Conv1x1 & Pooling & FC	7 × 7	1280	1



Il blocco iniziale e finale della rete è comune a tutti gli otto modelli. Tutte le reti di questa famiglia accettano come input immagini aventi risoluzione 224 x 224 e numero di canali pari a 3.

Tutti i modelli EfficientNet contengono nove blocchi che, esclusi quello iniziale e finale, sono composti da sotto-blocchi.

Il numero dei sotto-blocchi aumenta se ci muoviamo dalla EfficientNet B0 alla B7. In particolare, per effetto del metodo combinato di modificazione di scala, il numero totale di strati (layer) passa da 237, per la B0, a 813 per la B7. Si passa, rispettivamente, da 4 milioni di parametri a 64 milioni.

Il numero di canali di output dell'ultimo blocco passa dal valore 1280 della B0 a 2560 della B7, mentre la risoluzione di output rimane costante, pari a 7x7.

Ogni strato di convoluzione è seguito da una normalizzazione batch (batch normalization), che permette di normalizzare le caratteristiche estratte, attraverso regolazione e ridimensionamento delle attivazioni. Le caratteristiche estratte, dopo essere passate alla funzione di attivazione ReLU, vengono passate allo strato successivo.

La rete EfficientNet è una famiglia di modelli che ha mostrato prestazioni elevate dal punto di vista dell'accuratezza di validazione e dell'efficienza computazionale[46].

Se si comparano tali reti con altre reti convolutive esistenti sulla base di un set di validazione preso da immagini proveniente dall'archivio ImageNet<sup>18</sup>, si ottengono valori di accuratezza superiori per le prime.

La maggiore accuratezza è inoltre accompagnata da un numero dei parametri di modello sensibilmente inferiore, a dimostrazione della superiore efficienza computazionale. Tale risultato, ottenuto dagli autori di EfficientNet, è mostrato in figura 4.11.

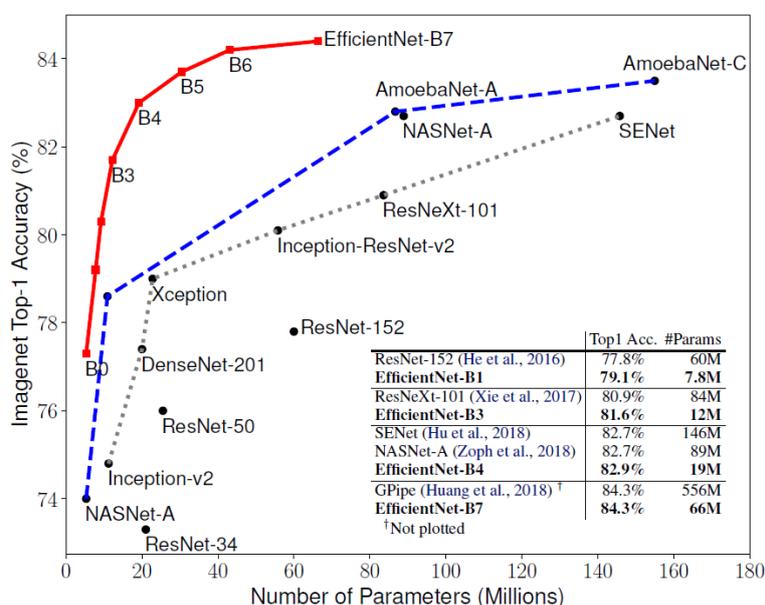


Fig. 4.11 – Confronto delle ConvNet in base a numero di parametri del modello e Accuratezza ottenuta dalla classificazione del dataset ImageNet [46].



Recenti studi hanno mostrato che una rete con buone performance sul dataset ImageNet ha buone prestazioni anche sul *Trasfer Learning* con altri dataset e altri compiti di riconoscimento di immagini [47]. Lo studio ha anche evidenziato che i compiti di classificazione con dataset di immagini di tipo “Fine-Grained”, cioè aventi classi di oggetti difficili da distinguere, non traggono beneficio dal pre-addestramento con ImageNet.

Le performance di EfficientNet in termini di accuratezza sono risultate elevate anche nel Transfer Learning con numerosi dataset diffusi in rete, per compiti simili. Gli autori mostrano che il Fine-tune della rete EfficientNet, pre-addestrata con il dataset ImageNet, porta accuratezze dell’ordine del 90% sui nuovi dataset. La tabella 4.3 mostra risultati confrontabili in termini di accuratezze tra EfficientNet ed altri modelli esistenti, a fronte di un numero di parametri sensibilmente inferiore.

Tab. 4.3– Confronto dei risultati di EfficientNet su dataset con transfer learning con altri modelli neurali esistenti[46].

	Comparison to best public-available results						Comparison to best reported results					
	Model	Acc.	#Param	Our Model	Acc.	#Param(ratio)	Model	Acc.	#Param	Our Model	Acc.	#Param(ratio)
CIFAR-10	NASNet-A	98.0%	85M	EfficientNet-B0	98.1%	4M (21x)	<sup>†</sup> Gpipe	99.0%	556M	EfficientNet-B7	98.9%	64M (8.7x)
CIFAR-100	NASNet-A	87.5%	85M	EfficientNet-B0	88.1%	4M (21x)	Gpipe	91.3%	556M	EfficientNet-B7	91.7%	64M (8.7x)
Birdsnap	Inception-v4	81.8%	41M	EfficientNet-B5	82.0%	28M (1.5x)	GPipe	83.6%	556M	EfficientNet-B7	84.3%	64M (8.7x)
Stanford Cars	Inception-v4	93.4%	41M	EfficientNet-B3	93.6%	10M (4.1x)	<sup>‡</sup> DAT	94.8%	-	EfficientNet-B7	94.7%	-
Flowers	Inception-v4	98.5%	41M	EfficientNet-B5	98.5%	28M (1.5x)	DAT	97.7%	-	EfficientNet-B7	98.8%	-
FGVC Aircraft	Inception-v4	90.9%	41M	EfficientNet-B3	90.7%	10M (4.1x)	DAT	92.9%	-	EfficientNet-B7	92.9%	-
Oxford-IIIT Pets	ResNet-152	94.5%	58M	EfficientNet-B4	94.8%	17M (5.6x)	GPipe	95.9%	556M	EfficientNet-B6	95.4%	41M (14x)
Food-101	Inception-v4	90.8%	41M	EfficientNet-B4	91.5%	17M (2.4x)	GPipe	93.0%	556M	EfficientNet-B7	93.0%	64M (8.7x)
Geo-Mean	(4.7x)						(9.6x)					

<sup>†</sup>GPipe (Huang et al., 2018) trains giant models with specialized pipeline parallelism library.

<sup>‡</sup>DAT denotes domain adaptive transfer learning (Ngiam et al., 2018). Here we only compare ImageNet-based transfer learning results.

Transfer accuracy and #params for NASNet (Zoph et al., 2018), Inception-v4 (Szegedy et al., 2017), ResNet-152 (He et al., 2016) are from (Kornblith et al., 2019).



## 4.4 Architettura della Rete Neurale proposta

In questa sezione verrà discussa la struttura della rete neurale convoluzionale utilizzata per la classificazione delle fessure.

Per il nostro problema di identificazione della fessura è stata utilizzata una rete neurale di architettura nota, a cui è stato sostituito il livello finale di output, per renderlo adatto al nostro compito di classificazione<sup>20</sup>. L'architettura di base della rete è costituita dal modello Efficientnet<sup>10</sup>. Il codice è stato modificato ed eseguito su macchine virtuali di server Google (Google Colab)<sup>21</sup>.

Inoltre, il modello è stato adattato allo specifico problema trattato ed addestrato con un archivio fotografico di oltre 50.000 fotografie.

### 4.4.1 Caratteristiche del modello

La scelta di implementare *EfficientNet* è dovuta alle elevate prestazioni offerte, a fronte di un basso costo computazionale, che la rende adatta ad un'implementazione su droni di ispezione per compiti di identificazione in tempo reale. L'input del modello *EfficientNet* è un'immagine di dimensione 224x224 e numero di canali pari a 3. L'output del modello è un tensore di dimensione ([64, 1280, 7, 7]).

Le features del modello, prima di essere passate al classificatore, vengono appiattite tramite un *Adaptive Average Pooling* ed un *.view*, generando un tensore di dimensione [64, 1280].

Il classificatore è composto da tre strati fully connected, l'ultimo dei quali fornisce output binario. Gli strati *Fully-Connected* sono intervallati da moduli *Dropout*.

In Tabella 4.4 sono mostrate le features di input e output dei tre moduli Fully-Connected del classificatore, con modello EfficientNetB2.

Tab 4.4 – Input features dei moduli del classificatore binario finale della rete, nel caso di utilizzo di EfficientNet B2.

Classificatore binario
Input features 1° Linear: 1408
Input features 2° Linear: 704
Input features 3° Linear: 234
Output 3° Linear: 2

La rete così costruita permette di classificare l'immagine come positiva o negativa, rispettivamente se la fessura è presente o meno nell'immagine.

### 3.4.2 Scelta del Dataset

La scelta di un dataset adeguato al compito assegnato risulta fondamentale al fine di ottenere risultati soddisfacenti in termini di predizioni corrette del modello. In rete sono presenti numerosi dataset contenenti immagini utili allo scopo di classificazione delle fessure. Molti di questi dataset sono ottenuti dalla divisione in blocchi a partire da immagini ad alta risoluzione. Molti di questi dataset non risultano utilizzabili a scopo di apprendimento di CNN a causa della presenza di numerose immagini spazzatura, non correlate alle features che si vogliono apprendere. Per la realizzazione della rete sono stati utilizzati quattro dataset disponibili in rete:

- **Dataset *data.mendley* [48]:** Il dataset contiene 40.000 immagini RGB della dimensione quadrata di 227 pixel, ottenute a partire da 458 immagini ad alta risoluzione (4032 per 3024 pixels) mediante il metodo Zhang et al.[49]. Le immagini sono ricavate da facciate e pavimentazioni in calcestruzzo di diversi edifici nel Campus METU in Turchia. Le immagini sono divise di due cartelle che ne definiscono il label, in base alla presenza o meno di fessure. Non è stato utilizzato il data augmentation per la realizzazione del dataset. Il dataset è stato testato con una rete CNN di identificazione e segmentazione dell'immagine in una pubblicazione relativa Rilevamento automatico di crepe sulla pavimentazione [11]50 e la sua composizione è mostrata in figura 4.12.



Fig. 4.12 – Composizione del dataset Mendley (a) Immagini con fessura. (b) Immagini senza fessura.

- **Dataset *SDNET2018* [51]:** Il Dataset contiene più di 56.000 immagini RGB della dimensione quadrata di 256 pixel, ottenute a partire da 230 immagini ad alta risoluzione (4068 × 3456 pixel) provenienti da impalcati da ponte, setti in CA e pavimentazioni. Le fessure incluse nel dataset hanno ampiezza variabile tra 0.06mm e 25mm. Ogni immagine rappresenta un'area fisica di circa 60x60mm. Le immagini sono divise di due cartelle che ne definiscono il label, in base alla presenza o meno di fessure. Il dataset contiene anche immagini con ampia varietà di ostruzioni, tra cui

ombre, rugosità superficiale, bordi, fori e detriti, come visibile in figura 4.13<sup>19</sup>.



Fig. 4.13 – composizione dell’archivio SDNET2018 <sup>19</sup>.

Il dataset è stato testato con *AlexNet*, rete CNN di identificazione dell’immagine, con e senza l’utilizzo del *Transfer Learning* [51]. L’accuratezza di classificazione del test set per i tre gruppi di immagini ha raggiunto, a seconda del metodo di training, valori compresi tra il 90.45 e 95.52%.

- **Dataset CSSC [51]:** Il dataset contiene fenomeni fessurativi e di spalling su superfici in calcestruzzo. La parte di dataset relativa ai fenomeni fessurativi contiene 15.000 immagini RGB della dimensione quadrata di 130 pixel, ottenute a partire da 954 immagini ad alta risoluzione raccolte dagli autori dalla rete e da scatti realizzati a Manhattan. Le immagini sono tagliate in sub-immagini in maniera casuale attraverso le Regione di Interesse (ROI). Una stessa fessura è presente in un certo numero di sub-immagini del dataset, ma in posizione differente. La sua composizione è mostrata in figura 4.14.

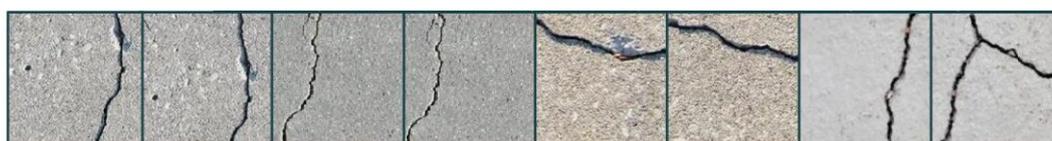


Fig. 4.14 - Composizione dell’archivio CSSC[51].

Il dataset è stato testato con un Fine-tune di VGG-16, rete CNN di classificazione dell’immagine. L’accuratezza di classificazione del test set per i tre gruppi di immagini ha raggiunto, a seconda del metodo di training, il valore 93.36%. Successivamente un algoritmo di image detection a permesso ad uno UAV di localizzare in tempo reale fessure e spalling in fase di ispezione. Infine, la combinazione di sensore inerziale IMU e camera ha permesso la ricostruzione 3D della superficie indagata[52].

- **Dataset CrackForest [53]:** Il Dataset contiene immagini di dimensione 480 x 320 pixel. È un database di immagini di crepe stradali.
- **Dataset DeepCrack [54]:** Il Dataset contiene 537 immagini RGB della dimensione 384 x 544 pixel, divise in training e test set, tutte contenenti fessure. Una stessa fessura è presente in un certo numero di sub-immagini del dataset, ma in posizione differente. la sua composizione è mostrata in figura 4.15.



Fig. 4.15 – Immagini rappresentative del Dataset DeepCrack [54].

I dataset sono stati singolarmente analizzati al fine di eliminare le immagini non utili per il compito di classificazione e rimosse le immagini non etichettate correttamente. I singoli dataset sono stati combinati assieme per la realizzazione di un unico set di dati da utilizzare per l'addestramento della rete.

In Tabella 4.5 è rappresentata il numero positivi e negativi utilizzati, il dataset di provenienza e il numero totale.

Tab 4.5 – Numerosità dei positivi e negativi utilizzati per l'addestramento della rete.

Dataset	Data.Mendley	SDNET2018	CSSC	CrackForest&DeepCrack	Totale
Positive	20000	5198	1681	445	27324
Negative	20000	6922	1681	445	29048

Il partizionamento del dataset negli insiemi di addestramento validazione e test è stato eseguito in maniera casuale, secondo le proporzioni indicate in tabella 4.6.

Tabella 4.6 – Partizionamento degli insiemi di addestramento,validazione e test.

<b>Dimensione di Addestramento</b>	85%
<b>Dimensione di Validazione</b>	13%
<b>Dimensione di Test</b>	2%

Il partizionamento è stato effettuato tenendo conto della diversa numerosità degli insiemi di partenza, rendendo i dataset uniformemente distribuiti nei tre insiemi. Tali numerosità sono mostrate in tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Modalità di suddivisione dei campioni negli insiemi addestramento, validazione e test.

Dataset	Data.Mendley	SDNET2018	CSSC	CrackForest&DeepCrack	Totale
Training	34000	10302	2857	756	47915
Validazione	5200	1575	437	116	7328
Test	800	243	68	18	1129

In figura 4.16 e Figura 4.17 è possibile vedere immagini rappresentative positive e negative, provenienti da ognuno dei quattro insiemi di partenza.

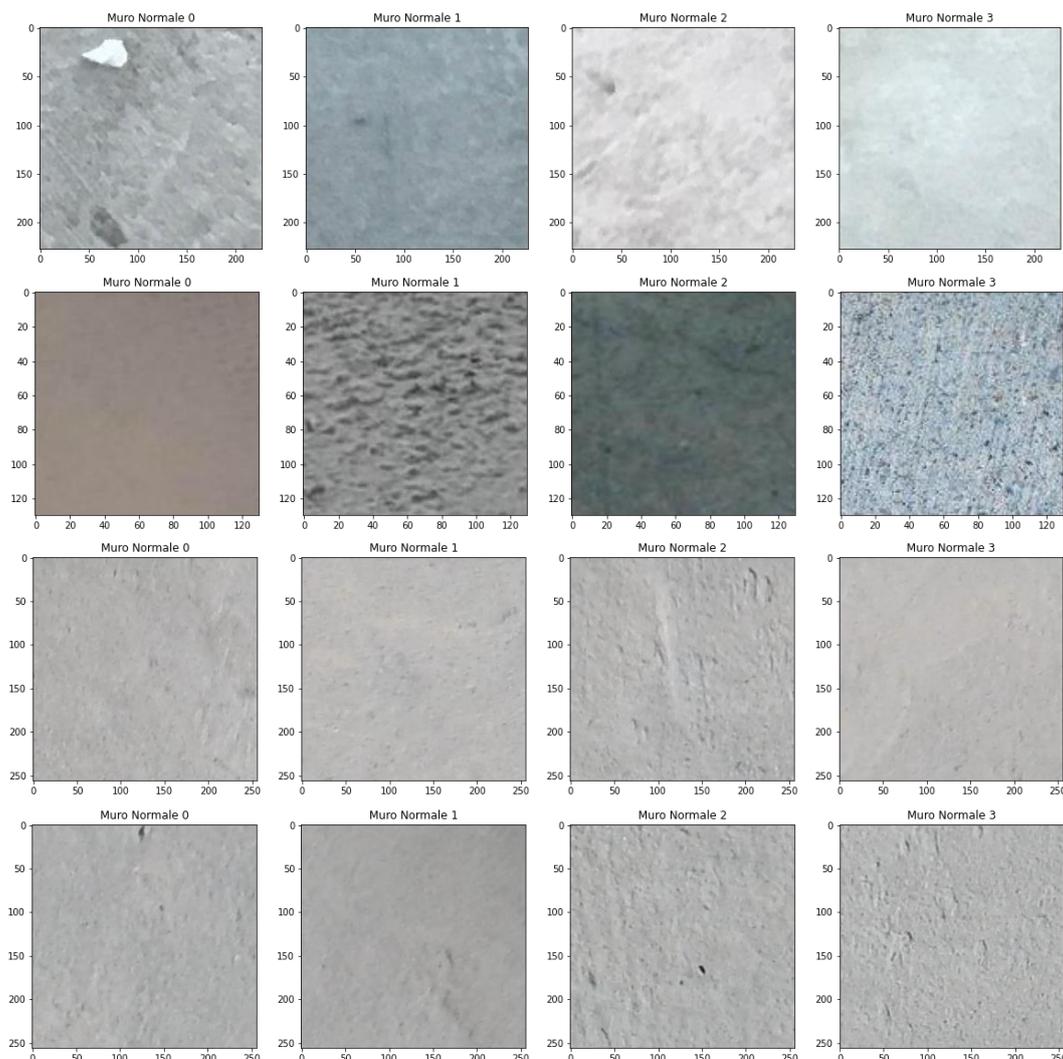


Fig. 4.16 – Immagini negative rappresentative di input della rete provenienti dai dataset: Data.Mendley, Data.Mendley, CSSC, CrackForest&DeepCrack.

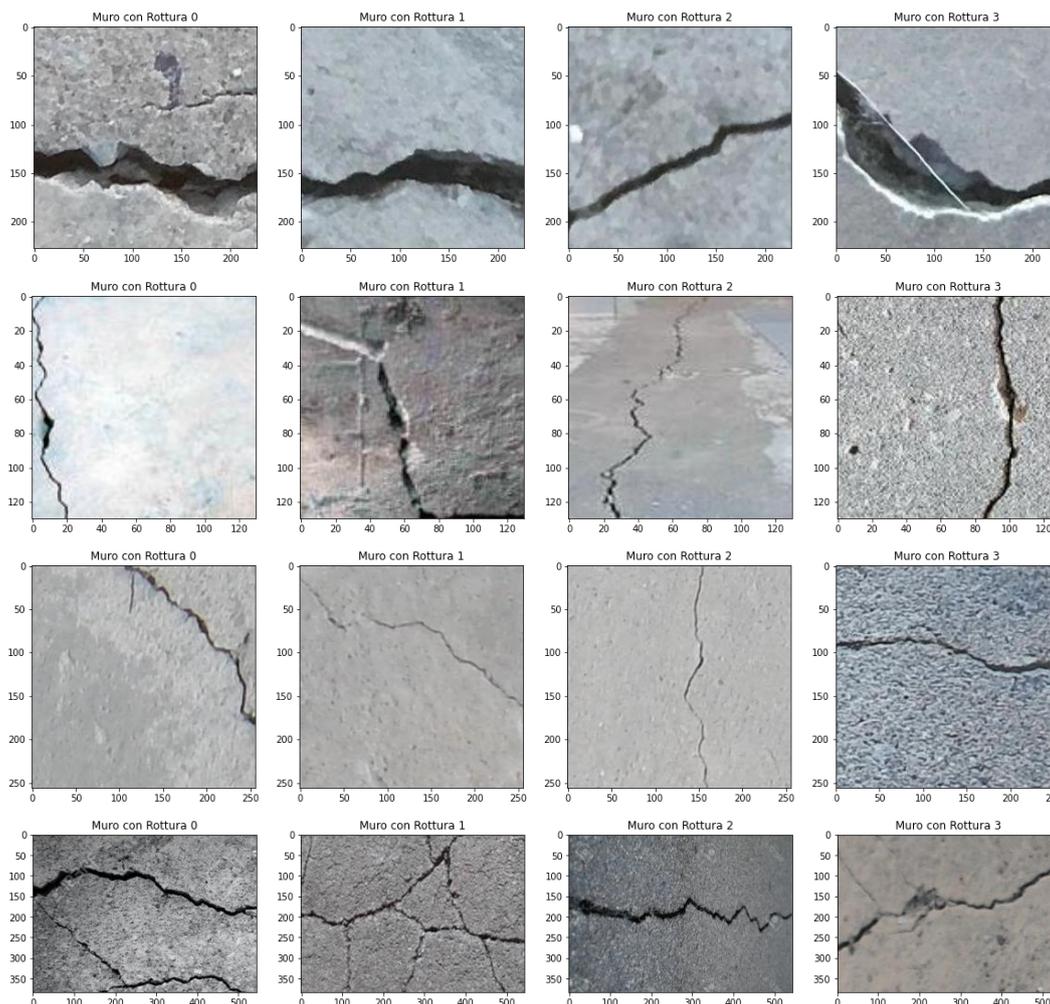


Fig. 4.17 – Immagini positive rappresentative di input della rete provenienti dai dataset: Data.Mendley, Data.Mendley, CSSC, CrackForest&DeepCrack.

#### 4.4.3 Trasformazioni applicate al dataset

Il caricamento del dataset avviene attraverso il comando `DataLoader` di *Pytorch*, il quale consente di utilizzare sia un dataset preconfezionato in rete sia i propri dati. *Pytorch* permette di applicare diverse trasformazioni randomiche alle immagini. È possibile applicare contemporaneamente più trasformazioni al dataset mediante il comando dell'utility *Torchvision*<sup>31</sup>, denominato *transforms.Compose*.

Tale comando non modifica il numero complessivo di campioni utilizzati nell'apprendimento nella singola epoca di allenamento, mantenendo così costante il numero di iterazioni per epoca. Infatti, esso fornisce un nuovo set di campioni trasformati in modo casuale ad ogni epoca. Le trasformazioni applicate sono di seguito indicate:



- Viene applicata la trasformazione *ToTensor* per trasformare le immagini in tensori, necessaria per operare con il framework *Pytorch*. I valori dei pixel delle immagini sono qui normalizzati dall'intervallo [0,225] a [0,1]. Le immagini sono inoltre trasformate in media nulla e varianza unitaria tramite normalizzazione.
- Tutte le foto vengono scalate alla dimensione 224x224, cioè la dimensione di input richiesta dalla rete *EfficientNet*.
- Vengono applicate le seguenti trasformazioni, alle sole immagini del set di addestramento: rotazione, capovolgimento verticale o orizzontale, saturazione, contrasto, luminosità, correzione gamma.

Le trasformazioni sono quindi riassunte nella tabella 4.8.

Tab. 4.8 – Trasformazioni applicate ai dataset impiegati.

<b>Lista delle trasformazioni applicate mediante utility <i>Torchvision</i></b>	
<b>Set di Addestramento</b>	<b>Set di Test e Validazione</b>
Resize(224,224)	Resize(224,224)
ToTensor(dataset_normalize_stats)	ToTensor(dataset_normalize_stats)
RandomRotate90	
Flip(p=0.5)	
ColorJitter(p=0.5)	
RandomGamma(p=0.5)	
RandomContrast(p=0.3)	
RandomBrightness(p=0.5)	

#### **4.4.4 Modalità di apprendimento**

Molti modelli pre-addestrati per il compito di classificazione di immagini presenti in rete, tra cui *EfficientNet*, sono stati addestrati con la base di dati *ImageNet*<sup>18</sup>. Ciò consente, piuttosto che addestrare la rete per intero, di addestrare soltanto gli ultimi livelli, così da ridurre i tempi di training. Verranno valutate e confrontate entrambe le metodologie di addestramento.

Il dataset *ImageNet*<sup>18</sup> è l'insieme di immagini con cui sono stati addestrati i modelli *EfficientNet*, composto da oltre 14 milioni di immagini etichettate, per un totale di oltre 20.000 categorie.

Il modello pre-addestrato *EfficientNet* viene caricato nel codice attraverso la stringa *EfficientNet.from\_pretrained*. Successivamente, attraverso il flag *feature\_extract* è possibile sceglierne la modalità di addestramento. In



particolare, è possibile utilizzare il modello in modalità *feature extraction*, congelando tutta la rete eccetto lo strato finale. Per utilizzare tale modalità in Pytorch, è necessario disabilitare il calcolo del gradiente mediante la stringa *requires\_grad*. Il calcolo del gradiente rimane così abilitato solamente per i parametri dei moduli *fully-connected* del nuovo classificatore aggiunto.

Se si esegue l'addestramento del solo classificatore finale, la normalizzazione delle immagini viene eseguita utilizzando le statistiche, già note a priori, dell'archivio *ImageNet*. Se si addestra l'intera rete da zero con le immagini del dataset, si utilizzano media e deviazione standard ricavate dal dataset stesso. I Parametri di normalizzazione sono mostrati in tabella 4.9.

Tabella 4.9 – Valori di media e deviazione standard utilizzati in fase di addestramento della rete.

<b>Parametri di normalizzazione del Dataset</b>			
Media dei campioni di addestramento	0.638	0.667	0.684
Deviazione standard dei campioni di addestramento	0.131	0.131	0.135
<b>Parametri di normalizzazione di ImageNet</b>			
Media dei campioni di addestramento	0.485	0.456	0.406
Deviazione standard dei campioni di addestramento	0.229	0.224	0.225

Al termine dell'addestramento viene generato un file di estensione *.ppt* contenente i parametri del modello, ossia il tensore dei pesi e dei *bias*. Tale file viene utilizzato per la successiva fase di test delle immagini.

Il metodo di salvataggio scelto, definito dalla stringa *.state\_dict()*, consente il salvataggio non dell'intero modello, ma esclusivamente dei suoi parametri.

Il successivo caricamento del modello, eseguito in fase di test, richiede di settare il modello in modalità "valutazione". Tale operazione è eseguita dalla stringa *model.eval()*, necessaria per il settaggio degli strati di *dropout* e di *batch normalization* del modello.



#### 4.4.5 Scelta del modello

Una rete avente un dato numero di parametri, non sempre è adatta a rilevare le *features* contenute in un dato dataset e per un determinato compito di classificazione. Modelli troppo complessi possono portare problemi di *overfitting*, mentre modelli troppo semplici possono portare ad *underfitting*.

Intuitivamente, all'aumentare della risoluzione delle immagini di input della rete, occorre incrementare la profondità della rete, così da poter catturare *features* composte da più pixel in immagini di dimensioni maggiore. Conseguentemente, occorre anche aumentare il numero di canali della rete, affinché possano essere catturati pattern più specifici anche in tali immagini ad alta risoluzione.

L'implementazione del modello EfficientNet nella rete di classificazione ha permesso di valutare quale fosse la dimensione della rete più adatta a rilevare le caratteristiche del set di immagini a disposizione, in termini di profondità, numero di canali e risoluzione dell'immagine di input.

A tal fine è necessario definire lo scopo per cui è stata realizzata, ovvero la sua applicazione pratica. L'obiettivo è la definizione di una rete che consenta applicazioni in tempo reale, quali riprese video. Affinché la rete possa essere utilizzata in fase di rilievo per l'identificazione di difetti su strutture a partire da mezzi radioguidati, è necessario limitarne il più possibile l'onere computazionale. Sulla base del numero di parametri che compone ciascun modello della famiglia EfficientNet, risulta conveniente non spingersi oltre la versione "B4".

Si vuole quindi ricercare il modello avente rapporto performance su costo computazionale massimo. Affinché sia possibile confrontare modelli differenti, è necessario che questi vengano valutati a parità degli iperparametri di modello. I valori scelti sono indicati nella tabella 4.10.

Tab. 4.10 – Valori degli iperparametri di modello fissati per la comparazione dei modelli EfficientNet.

Iperparametri di modello fissati	
Tasso di Apprendimento	0.001
Tasso di Decadimento	0.01
Epoche di Addestramento	20
Tipo dei lotti	Mini-Batch
Dimensione dei lotti	128
Funzione di Perdita	BCELossWithLogits
Ottimizzatore	Adam
Estrazione delle Caratteristiche	Abilitata

Successivamente si esegue l'addestramento del modello EfficientNet-B0 fino al B4, facendo uso del dataset definito nel sottoparagrafo 4.4.1.



Le curve di validazione e di addestramento sono indicate in figura 4.18 e 4.19.

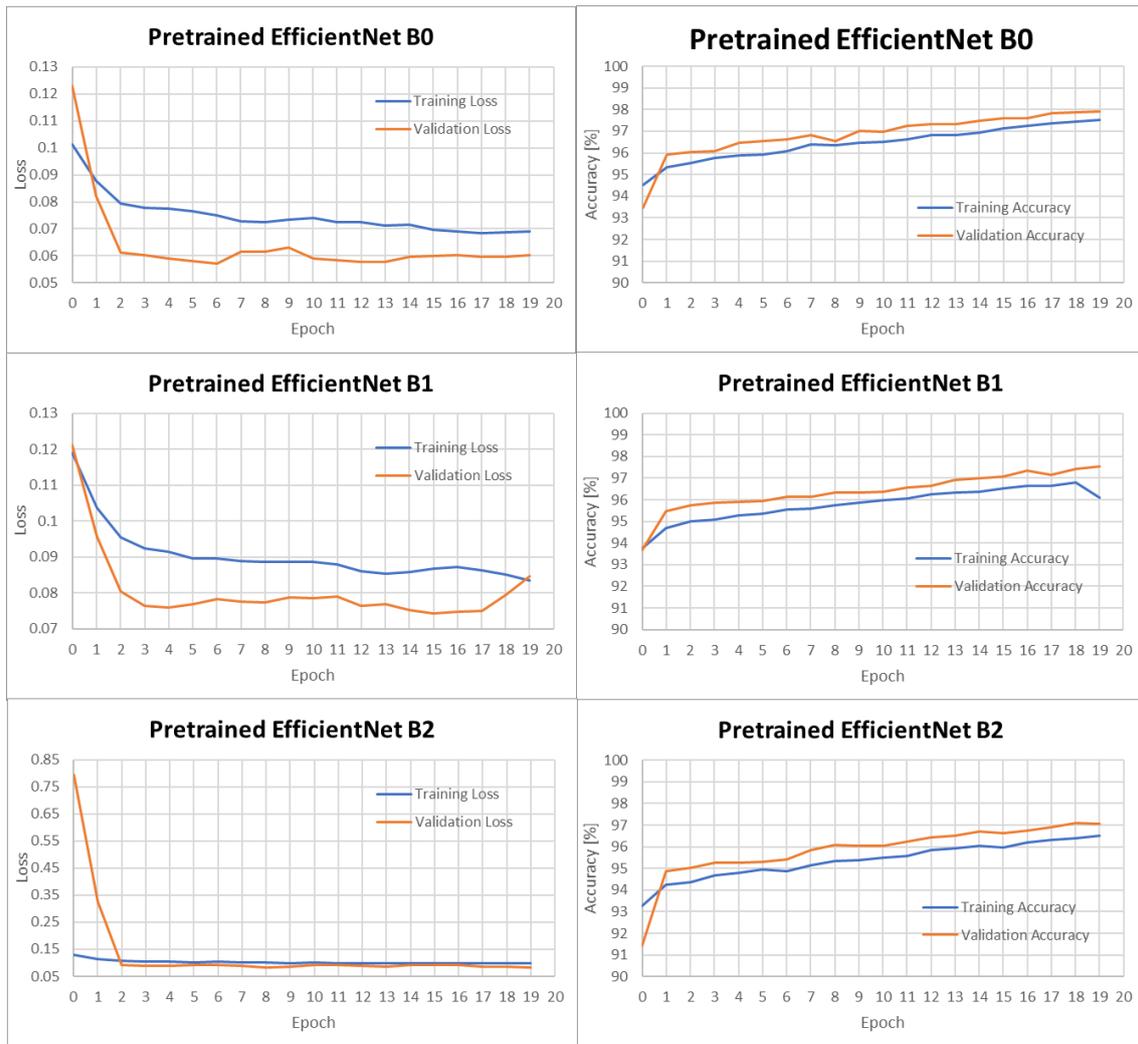


Fig. 4.18 – Curve di validazione e di addestramento ottenute dall'addestramento del modello EfficientNet-B0 (in alto), B1 (al centro) e B2 (in basso).

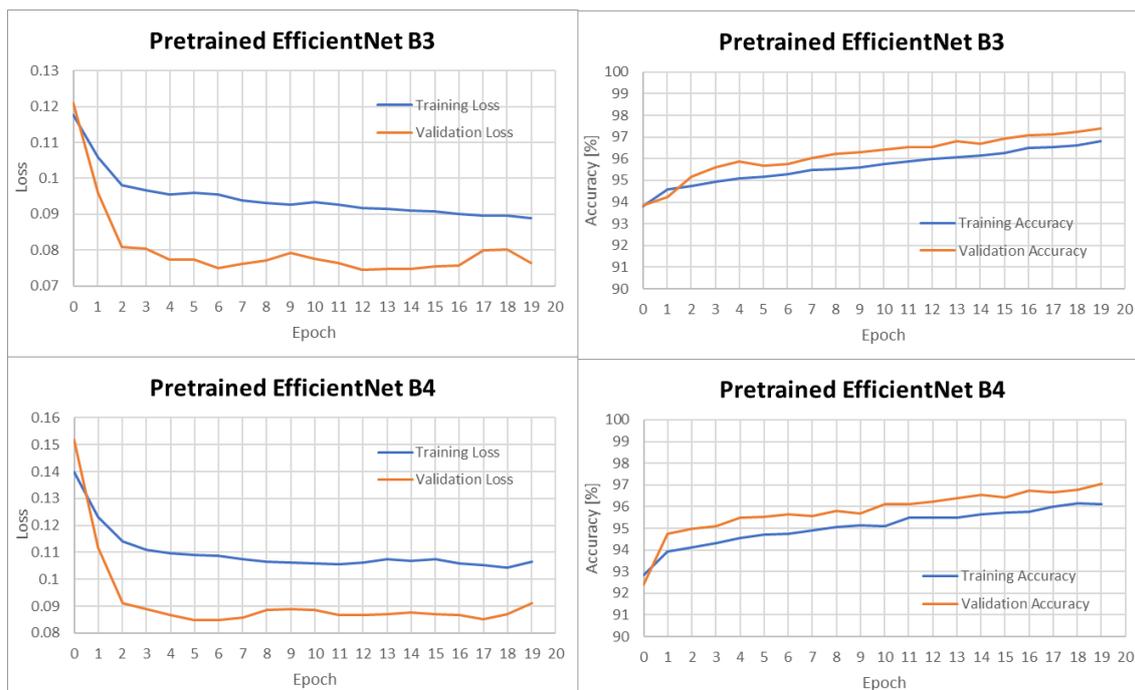


Fig. 4.19 – Curve di validazione e di addestramento ottenute dall’addestramento del modello EfficientNet-B3 (in alto) e B4 (in basso).

Le curve sono diagrammate al variare della funzione di perdita o dell’accuratezza durante le epoche di addestramento. Sono state quindi valutate le performance di classificazione dei modelli mediante i criteri indicati nel sottoparagrafo 4.3.5. Si confronta di seguito il valore di accuratezza del set di test di ogni modello ed il tempo complessivamente necessario al dispositivo per completare l’addestramento, definito “Wall Time” in tabella 4.11.

Tab. 4.11 – Parametri di valutazione dei modelli ottenuti dall’addestramento degli stessi. I tempi di training sono riferiti ad un addestramento eseguito mediante *feature extraction*.

Model	Wall Time	Test Accuracy [%]
B0	0h 27min 12s	98.09
B1	0h 40min 12s	97.83
B2	0h 40min 16s	97.12
B3	1h 09min 25s	97.43
B4	1h 32min 51s	96.94

Tale tabella mostra il ruolo che i *learnable parameters* del modello hanno in relazione alle performance e all’aumento dei tempi computazionali. Le matrici di confusione sono di seguito rappresentate:

$$\begin{pmatrix} 1111 & 27 \\ 16 & 1102 \end{pmatrix}_{B0} \begin{pmatrix} 1115 & 23 \\ 26 & 1092 \end{pmatrix}_{B1} \begin{pmatrix} 1106 & 32 \\ 33 & 1085 \end{pmatrix}_{B2} \begin{pmatrix} 1110 & 28 \\ 30 & 1088 \end{pmatrix}_{B3} \begin{pmatrix} 1102 & 36 \\ 33 & 1085 \end{pmatrix}_{B4}$$

in cui il pedice rappresenta il modello di appartenenza, tra i cinque indagati.



In Tabella 4.12 sono mostrate le features di input dei tre moduli Fully-Connected che compongono il classificatore, seguiti dal singolo neurone di output, tipico dei classificatori binari.

Tab 4.12 – Sono indicate le “Input features” dei moduli del classificatore binario finale della rete, per le varie reti indagate.

<b>Classifier</b>	<b>B0</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>
<b>Input 1° Fully Connected Layer</b>	1280	1280	1408	1536	1792
<b>Input 2° Fully Connected Layer</b>	640	640	704	768	896
<b>Input 3° Fully Connected Layer</b>	213	213	234	256	298
<b>Output 3° Fully Connected Layer</b>	1	1	1	1	1
<b>Model Backbone Params</b>	213	301	301	340	418

Sulla base dei parametri di valutazione visti finora, in particolare dei tempi computazionali, si ritiene la EfficientNet B2 la più adatta al compito prefissato. L'uso di reti più profonde, quali la EfficientNet-B7, è in genere consigliabile per applicazioni che non richiedano bassi tempi di risposta della macchina. Infatti, l'aumento degli strati convolutivi mostra solitamente un miglioramento delle performance in termini di classificazione delle fessure.

Si vuole qui ricordare che le valutazioni fatte nel presente paragrafo sono relative a reti convolutive addestrate mediante uso di estrazione delle caratteristiche. L'utilizzo del transfer learning è molto utile in fase di valutazione del modello, in quanto consente di ridurre considerevolmente l'onere computazionale del training, senza compromettere il risultato finale in termini di performance. In tabella 4.13 viene confrontato, a parità degli altri iperparametri, l'addestramento per intero della rete con quello mediante addestramento del solo classificatore finale.

Tab 4.13 – Confronto di diverse metodologie di addestramento di reti neurali convolutive.

<b>Model</b>	<b>Estrazione delle Caratteristiche</b>	<b>Wall Time</b>	<b>Test Accuracy [%]</b>
EfficientNet-B2	Abilitata	0h 40min 16s	97.12
EfficientNet-B2	Disabilitata	2h 54min 00s	90.91

Complessivamente, la rete EfficientNet-B2 mostra una buona capacità trasferire le features apprese a nuovi compiti.



#### 4.4.6 Ottimizzazione degli iperparametri

L'ottimizzazione degli iperparametri del modello è avvenuta attraverso una valutazione delle curve di Apprendimento e di Convalida, come definito nel paragrafo 3.3.4.1. Le curve, rappresentate in relazione della funzione di perdita, non mostrano problemi di *underfitting*, *overfitting* e non rappresentatività del Dataset. Vengono di seguito identificati i valori numerici ottimali degli iperparametri per il modello EfficientNet scelto.

Si utilizza una funzione di perdita adatta ad un classificatore binario, cioè la Funzione di entropia incrociata binaria.

Il *Weigh Decay* (L2) è stato implementato tramite *Pytorch* inserendo la stringa *wd* all'interno della riga in cui è richiamato l'ottimizzatore. *Pytorch* applica il parametro di regolarizzazione sia ai pesi che ai bias del modello.

*Pytorch* implementa il Dropout nella funzione *nn.Dropout*. Il dropout è stato inserito nel classificatore finale tra strati successivi di tipo Fully-Connected. In particolare, sono presenti due strati di Dropout, rispettivamente con probabilità p di azzeramento di un elemento pari 0.5 e 0.3. Dato che modelli di dimensione maggiore richiedono maggiore regolarizzazione, il Dropout è stato linearmente incrementato da 0.3 per EfficientNet-B0 a 0.5 per EfficientNet-B4.

In tabella 4.14 sono indicati i valori scelti per gli iperparametri del modello EfficientNet-B2, tenuti fissi per definire il valore ottimale delle epoche di addestramento.

Tab. 4.14 - Iperparametri fissati per la definizione del numero ottimale di epoche di addestramento.

EfficientNet-B2 Model	
Tasso di Apprendimento	0.001
Tasso di Decadimento	0.01
Tipo dei lotti	Mini-Batch
Dimensione dei lotti	320
Funzione di perdita	BCELossWithLogits
Ottimizzatore	Adam
Estrazione delle Caratteristiche	Abilitata
Set di Addestramento	83%
Set di Validazione	13%
Set di Test	4%



#### 4.4.7 Risultati del modello scelto

Dal confronto dei vari modelli appartenenti alla famiglia EfficientNet, si è ritenuto più adatto a tale compito di classificazione il modello EfficientNet-B2. In particolare, l'utilizzo del transfer learning in tale compito di classificazione ha fornito risultati migliori rispetto all'addestramento per intero della rete.

La rete è stata addestrata con 10 epoche e mostra i migliori risultati con tasso di apprendimento pari a 0.001 e tasso di decadimento pari a 0.01. In tale situazione, come mostrato in figura 4.20, si hanno buone performance in termini di andamento delle curve di training e di validazione, che risultano decrescenti e quasi sovrapposte.

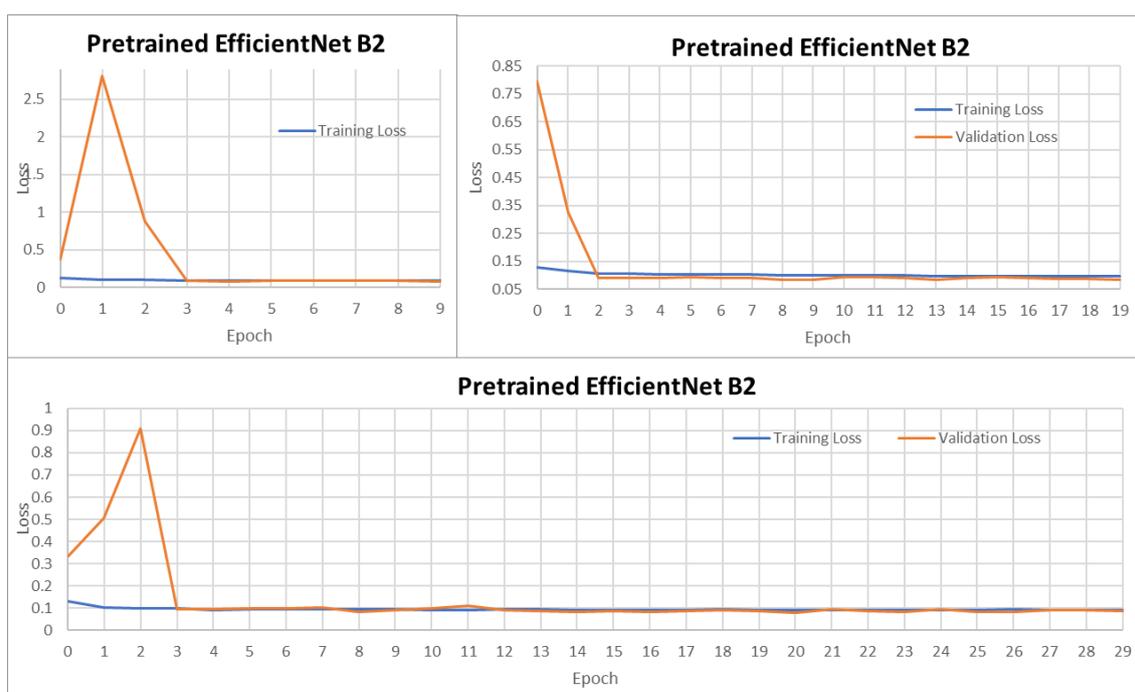


Fig.4.20 – Curva di validazione e di addestramento al variare del numero di epoche di addestramento. L'addestramento è stato ripetuto con numero di epoche di addestramento di 10, 20 e 30 ed in modalità *feature extraction*.

I risultati dell'addestramento, eseguito con numero di epoche pari a 10, 20 e 30, in termini di accuratezza sono riportati nella tabella 4.15.

Tab 4.15 – Valori di accuratezza ottenuti addestrando la rete con differente numero di epoche, in modalità *feature extraction*.

EfficientNet B2 Model	
Epoche	Test Accuracy [%]
10	97.21
20	97.12
30	97.38



Il tempo richiesto per il training, nel caso di 10 epoche di addestramento e con gli iperparametri precedentemente fissati, è pari a 30 minuti. La corrispondente matrice di Confusione è riportata di seguito.

$$\begin{pmatrix} 1105 & 33 \\ 30 & 1088 \end{pmatrix}_{B2}$$

#### 4.4.8 Algoritmo di Segmentazione

La rete di classificazione vista precedentemente, viene utilizzata in un codice di segmentazione dell'immagine. Il funzionamento dell'algoritmo di segmentazione è di seguito indicato:

1. Il codice, che consente la segmentazione, crea una griglia ed un nuovo strato sull'immagine. Tale strato rappresenta un array di pixel di dimensione uguale all'immagine di Test, con valori di intensità dei pixel nulli.
2. Ogni sotto immagine di dimensione 227x227, che rappresenta una cella della griglia, viene data in pasto alla rete per la classificazione.
3. Se l'etichetta assegnata è positiva, allora l'array di pixel corrispondente a quella specifica cella viene colorato di verde.
4. Una volta processate tutte le sotto immagini, lo strato viene sovrapposto all'immagine di partenza, con intensità di colore pesate, in modo da evidenziare di verde le porzioni dell'immagine dove è presente la fessura.

Se si decide di utilizzare una griglia avente lato della maglia differente, le sotto immagini saranno comunque scalate alla dimensione 224x224 al momento della classificazione. Conseguentemente, per mantenere la coerenza degli input di addestramento e di test, è necessario che anche le immagini del training set vengano preventivamente scalate alla stessa dimensione delle immagini di input del codice di segmentazione. Ciò rende le immagini di addestramento più simili a quelle di input nell'uso reale. Per tale motivo, si è scelto di mantenere il lato della maglia coincidente con la risoluzione di input richiesta dalla rete.

Sono state scelte alcune immagini di test con risoluzioni differenti ed è stato testato il funzionamento del codice di segmentazione dell'immagine.

In figura 4.21 sono mostrati i risultati della segmentazione applicata su modello EfficientNet-B2.

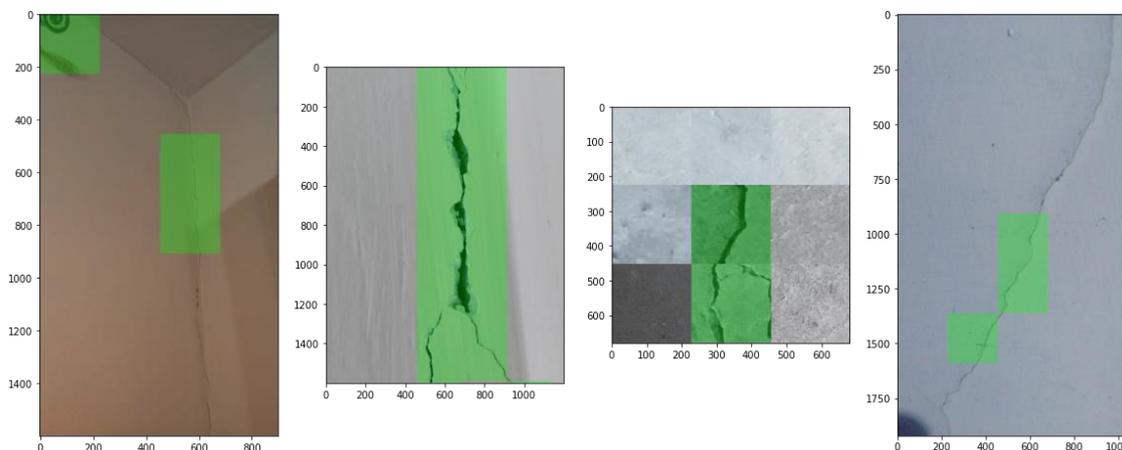


Fig. 4.21 – Risultato dell'applicazione della segmentazione sull'immagine mediante rete EfficientNet-B2. Sono evidenziate in verde le porzioni di immagine in cui è rilevata una fessura.

È evidente come il comportamento dell'algoritmo non sia sempre ottimale, segno di una capacità limitata della rete di generalizzare. Analogamente, anche altre reti appartenenti alla stessa famiglia mostrano problemi nel generalizzare ad immagini mai viste prima, come mostrato in figura 4.22.

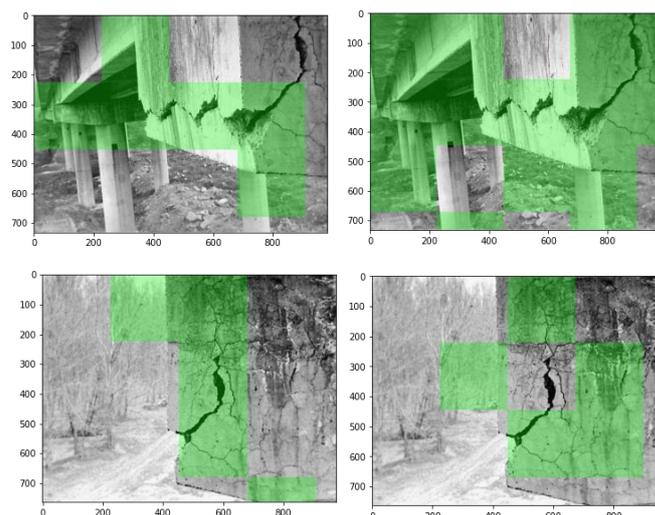


Fig. 4.22 – Confronto tra metodo di segmentazione con utilizzo di EfficientNet-B2 e EfficientNet-B4, rispettivamente a sinistra e a destra.



#### 4.4.9 Aspetti computazioni

La scelta del linguaggio *Python* risiede nella semplicità di utilizzo, nella vasta mole di librerie presenti e nella compatibilità con qualsiasi sistema operativo. Le prestazioni dei linguaggi interpretati come *Python* sono inferiori dal punto di vista computazionale rispetto a quelle dei linguaggi di programmazione a basso livello. Ciò nonostante, alcune librerie contenute in *Python*, come *NumPy*, sono state sviluppate sulla base di implementazioni di basso livello, permettendo così di accelerare le operazioni sui vettori. In particolare, la rete qui realizzata sfrutta proprio *NumPy* per gestire e operare su array multidimensionali.

##### 4.4.9.1 Framework

Nello sviluppo software, un framework è un'architettura logica di supporto sul quale un software può essere progettato e realizzato, spesso facilitandone lo sviluppo da parte del programmatore<sup>24</sup>.

Lo scopo di un framework è infatti quello di risparmiare allo sviluppatore la riscrittura di codice già scritto in precedenza per compiti simili<sup>25</sup>.

Come già precedentemente menzionato, la rete è realizzata facendo uso del framework *Pytorch*. *Pytorch* è uno dei framework più utilizzati al momento. Viene utilizzato per costruire reti neurali ed eseguirne l'addestramento. *Pytorch* è stato sviluppato da Facebook AI Research ed è basato sul linguaggio *Python*. L'elemento fondamentale di *Pytorch* sono i tensori, matrici multidimensionali di valori numerici, utilizzati per qualsiasi calcolo.

*Pytorch* è composto da un numero estremamente elevato di librerie, le quali contengono tutte le funzioni necessarie per lo sviluppo di una rete neurale.

##### 4.4.9.2 Hardware utilizzato

La fase di addestramento e di test del modello convoluzionale è stata eseguita sulla piattaforma Google Colab. La piattaforma permette di eseguire codice *Python* attraverso un browser web, senza richiedere setup o installazioni. La piattaforma fornisce risorse limitate alla community, sia nel tempo che nelle macchine fornite. In particolare, in tale lavoro è stata utilizzata una GPU NVIDIA Tesla K80 avente 12GB di memoria RAM.

La limitata disponibilità di RAM si riflette anche sul numero massimo di Batch che è possibile impostare in fase di addestramento della rete. In particolare, a causa dello spazio necessario in RAM per immagazzinare neuroni e parametri della rete, non è stato possibile utilizzare Batch Size maggiori di 128 per le reti più profonde della famiglia *EfficientNet*.



L'utilizzo della GPU, nel framework Pytorch, può essere abilitato mediante la stringa di codice *torch.device ("cuda")*.

Dato che tutti gli elementi tensore vengono creati di default sulla CPU, è necessario trasferirli alla GPU, nel caso in cui essa venga utilizzata. Analogamente, dato che la libreria *NumPy* può operare solo su CPU, una conversione da tensore ad array *NumPy* non può essere eseguita su GPU.

## 4.5 Conclusioni

In definitiva, i modelli finora indagati mostrano sia buone performance, in termini di accuratezza, che basso onere computazionale. Di contro, tali reti presentano problemi di non rappresentatività del dataset di validazione. Come si evince dalle figure 4.19 e 4.20, il dataset di validazione risulta troppo facile da predire, in quanto la curva di training è spesso al di sotto di quella di addestramento. La causa di tale comportamento risiede nelle caratteristiche dei dataset utilizzati per l'addestramento. La presenza di elementi condivisi tra set di addestramento e di validazione o di test, oppure la presenza di legami diretti tra le features di immagini provenienti dai suddetti insiemi, è probabilmente la causa di questo comportamento. Per tale motivo, nel trattamento del dataset utilizzato per le analisi, non sono comprese tecniche di *data augmentation*.

### 4.5.1 Futuri sviluppi

Le reti di identificazione e segmentazione dei difetti realizzate rappresentano il passo iniziale di un lavoro di portata molto maggiore.

L'efficienza computazionale della rete, dovuta al basso numero di parametri del modello *EfficientNet*, ne consente l'implementazione all'interno di sistemi di monitoraggio UAV per il riconoscimento in loco dei difetti.

La futura disponibilità di nuovi dataset permetterà all'algoritmo di acquisire maggiori capacità di generalizzazione.

Inoltre, con opportuno materiale fotografico, è possibile estendere l'identificazione della fessura anche a differenti superfici, quali metallo e muratura. Sarà inoltre possibile estendere l'identificazione anche a differenti difetti strutturali, quali ad esempio lo *spalling*.



## Sitografia del capitolo

1. [https://it.wikipedia.org/wiki/Rete\\_generativa\\_avversaria](https://it.wikipedia.org/wiki/Rete_generativa_avversaria)
2. <https://towardsdatascience.com/intuitively-understanding-convolutions-for-deep-learning-1f6f42faee1>
3. [http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/9\\_ML\\_DeepLearning.pdf](http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/9_ML_DeepLearning.pdf)
4. <https://machinelearningmastery.com/gentle-introduction-mini-batch-gradient-descent-configure-batch-size/>
5. <https://qastack.it/datascience/16807/why-mini-batch-size-is-better-than-one-single-batch-with-all-training-data>
6. <https://iaml.it/blog/deep-learning-ottimizzazione#esempio-addestramento-di-una-cnn>
7. [http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/8\\_ML\\_RetiNeurali.pdf](http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/8_ML_RetiNeurali.pdf)
8. <https://risposta.org/17265654/Softmax-viene-utilizzato-quando-verr%C3%A0-utilizzata-solo-la-classe-pi%C3%B9-probabile>
9. [https://gombbru.github.io/2018/05/23/cross\\_entropy\\_loss/](https://gombbru.github.io/2018/05/23/cross_entropy_loss/)
10. <https://www.kaggle.com/vishnurapps/ensuring-building-safety-using-efficientnets/notebook>
11. <https://core.ac.uk/download/pdf/14692189.pdf>
12. <https://towardsdatascience.com/what-is-deep-transfer-learning-and-why-is-it-becoming-so-popular-91acdcc2717a>
13. [http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/2\\_ML\\_Fondamenti.pdf](http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/2_ML_Fondamenti.pdf)
14. <https://tech.lccos.com/52956/come-funziona-il-metodo-di-abbandono-nellapprendimento-profondo-e-perche-si-dice-che-sia-un-trucco-efficace-per-migliorare-la-tua-rete.html>



15. <https://qastack.it/stats/241645/how-to-explain-dropout-regularization-in-simple-terms>
16. <https://stats.stackexchange.com/questions/384484/how-should-i-standardize-input-when-fine-tuning-a-cnn>
17. <https://machinelearningmastery.com/learning-curves-for-diagnosing-machine-learning-model-performance/>
18. <https://www.image-net.org/>
19. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340918314082>
20. <https://www.kaggle.com/vishnurapps/ensuring-building-safety-using-efficientnets/notebook>
21. <https://colab.research.google.com/>
22. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Logistic-curve.svg>
23. <https://www.kaggle.com/dansbecker/rectified-linear-units-relu-in-deep-learning>
24. <https://dreamonkey.com/it/blog/che-cos-e-un-framework/>
25. <https://it.wikipedia.org/wiki/Framewor>
26. <https://qastack.it/stats/260505/machine-learning-should-i-use-a-categorical-cross-entropy-or-binary-cross-entro>
27. <https://towardsdatascience.com/this-thing-called-weight-decay-a7cd4bcfcab>
28. [http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/8\\_ML\\_RetiNeurali.pdf](http://bias.csr.unibo.it/maltoni/ml/DispensePDF/8_ML_RetiNeurali.pdf)
29. [https://it.wikipedia.org/wiki/Precisione\\_e\\_recupero](https://it.wikipedia.org/wiki/Precisione_e_recupero)
30. <https://image-net.org/challenges/LSVRC/>
31. <https://pytorch.org/vision/stable/transforms.html>



## Capitolo 5

# Analisi funzionale delle Linee guida sui ponti

In questo capitolo viene effettuata un'analisi approfondita delle nuove linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti rilasciate nel 2020 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Trattandosi di un argomento relativamente recente, risulta necessario partire da una panoramica generale del problema, effettuando un esame di tutti i nodi decisionali previsti, prima di entrare in argomenti specifici. È stata posta particolare attenzione a tutti i passaggi logici che vengono seguiti nell'intero documento, in vista di una successiva implementazione all'interno di un software ad uso commerciale.

Verrà proposta una schematizzazione grafica delle Linee Guida, suddivisa in differenti processi, adatta ad un'implementazione in un software di gestione. Ogni processo è mostrato da un diagramma di flusso e include un certo numero di attività e passaggi decisionali, così come descritti all'interno del documento. Infine, sarà realizzata una nuova schematizzazione del processo ispettivo, con l'ipotesi che vengano utilizzati in esso strumenti di ispezione avanzata. Si immagina di integrare il sorvolo della struttura tramite drone e il rilevamento del danno strutturale tramite rete neurale convolutiva, implementata nel drone stesso, nella fase ispettiva.

## 5.1 Analisi dei nodi decisionali previsti dalle linee guida

Il testo delle linee guida per i ponti esistenti rappresenta attualmente l'unico testo di riferimento specifico per la gestione e manutenzione dei ponti esistenti. Il documento fornisce ad enti pubblici e gestori privati una metodologia precisa e unificata e soprattutto specifica per questa tipologia di opere. Il documento si rifà a numerose esperienze nazionali, come quella di Anas, del Cias e della provincia autonoma di Trento, ma anche ad importanti manuali internazionali come quello prodotto da AAHSTO e dal progetto Europeo BRIME. Il testo, di carattere fortemente descrittivo, può essere tradotto in termini di procedure e passaggi logici e quindi schematizzato in forma grafica di diagrammi di flusso.

Il flusso logico che definisce le interazioni tra i vari livelli di analisi proposti dalle linee guida, preso dallo stesso testo, è mostrato in figura 5.1.

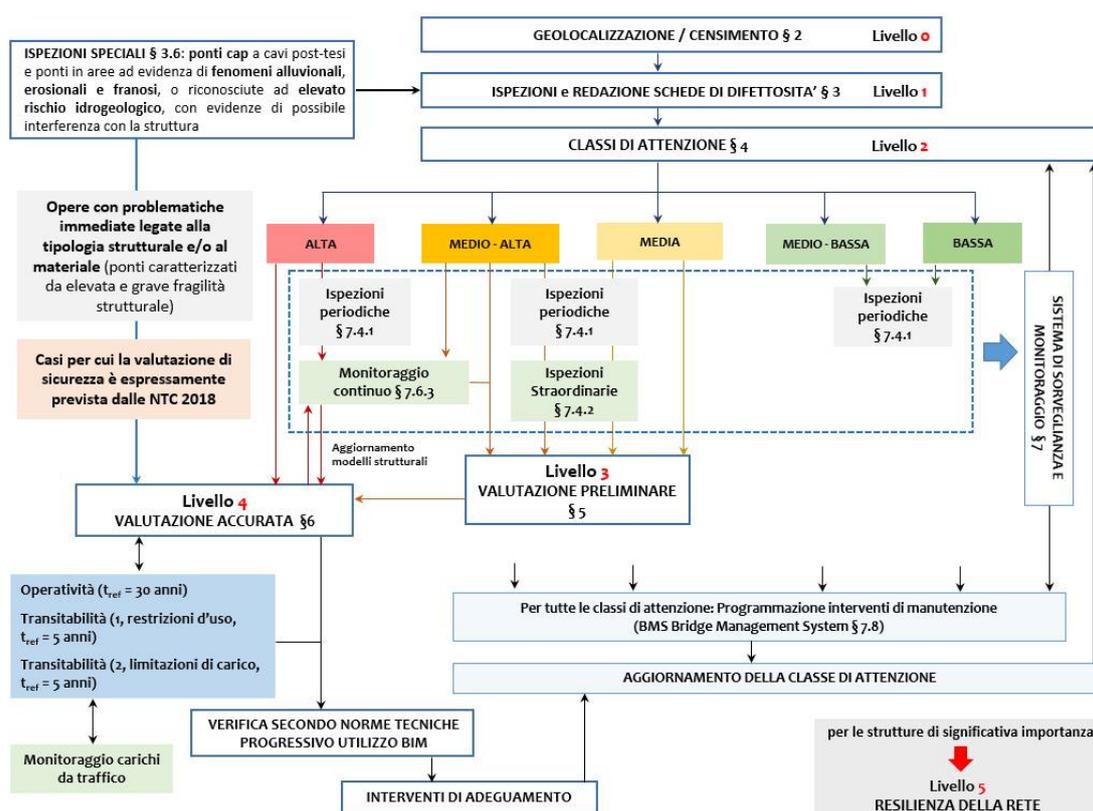


Fig. 5.1 – Approccio proposto dalle linee guida e relazioni tra i livelli di analisi proposti[8].

Appare di fondamentale importanza chiarire nel dettaglio le relazioni che intercorrono tra le diverse procedure, al fine di una loro corretta applicazione ed eventuale implementazione in sistemi informatici di gestione BMS .

I vari livelli di analisi delle linee guida possono essere schematizzati dal punto di vista procedurale e secondo una forma di tipo causa-effetto che ne mostri implicazioni ed effetti in termini di interazioni con le altre procedure.

È importante osservare che le linee guida lasciano un buon grado di libertà agli enti gestori delle infrastrutture italiane dal punto di vista delle procedure da adottare e delle loro tempistiche di avvio e completamento.

## 5.2 Enti responsabili di attività, controlli, decisioni e comunicazioni

In Italia i controlli sui ponti devono essere eseguiti secondo procedure conformi alle Circolari n. 6736 del 19/07/1967 e n. 34233 del 15/02/1991. In Italia non esiste alcuna legge che obblighi il conseguimento di specifiche certificazioni al fine di eseguire operazioni di censimento, ispezione ordinarie, straordinarie o speciali e scelta delle azioni correttive più adeguate. Tuttavia, esistono enti certificatori esterni che garantiscono l'idoneità del soggetto dal punto di vista della preparazione a tali compiti specifici. Le Linee Guida sui ponti stabiliscono che i requisiti per la competenza degli operatori saranno definiti in futuri decreti.

### 5.2.1 Enti responsabili della produzione di documenti

Premessa l'assenza di requisiti per eseguire le attività sopra discusse, è comunque possibile definire grossolanamente gli enti coinvolti in ambito di gestione di ponti esistenti, coerentemente con le Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti. In figura 5.2 è rappresentato uno schema dei principali enti coinvolti, delle procedure di cui sono responsabili e delle finalità delle stesse.

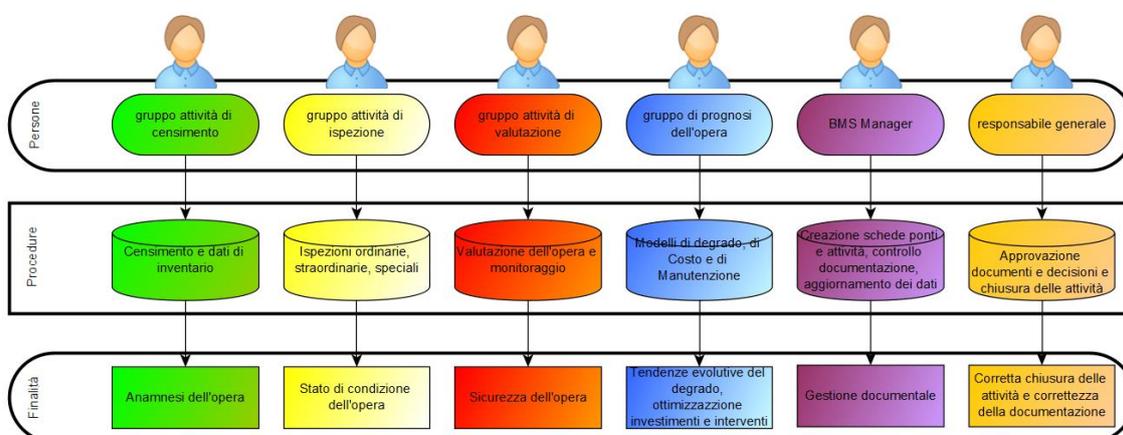


Fig. 5.2 – Principali enti coinvolti un sistema BMS coerente con le Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti.

In accordo con le Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti, la documentazione che deve essere prodotta dagli enti coinvolti nelle attività è rappresentata in figura 5.3.

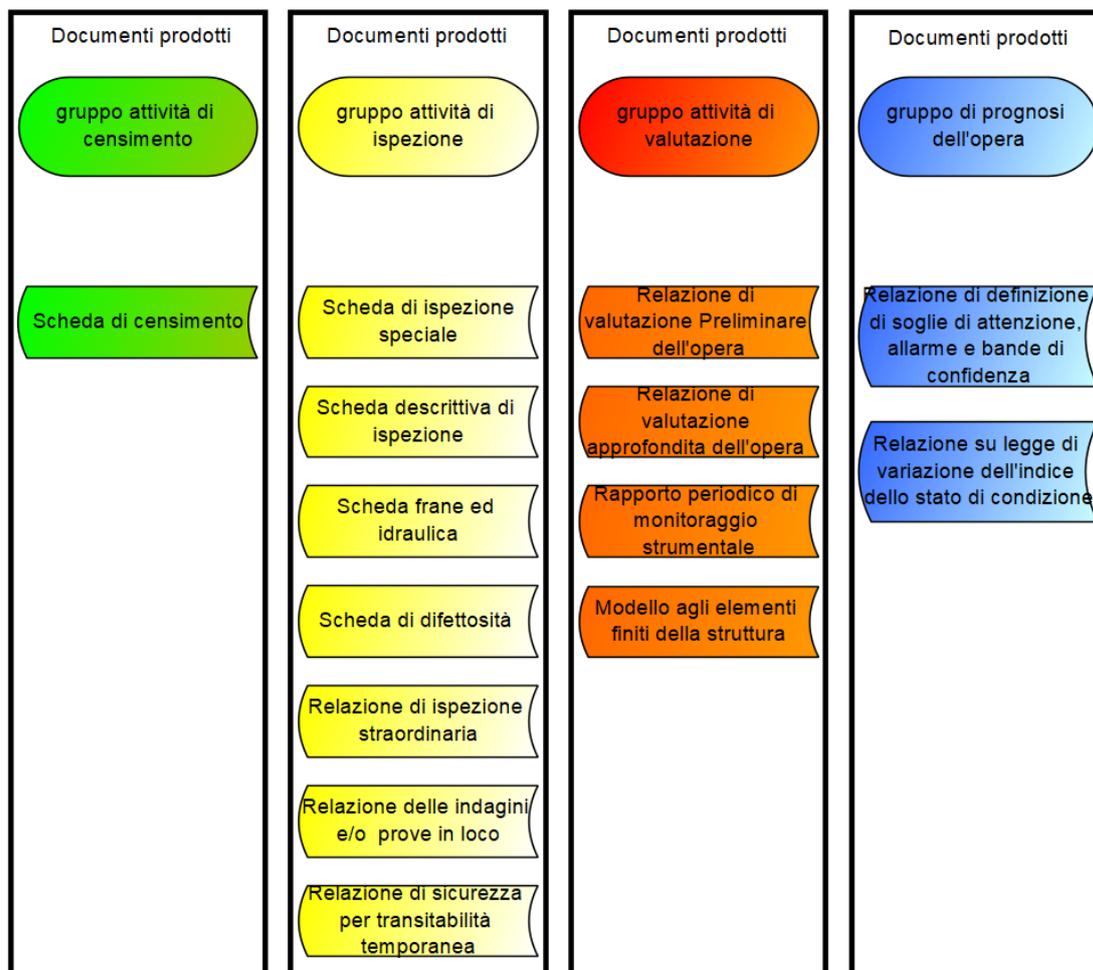


Fig. 5.3 - Documentazioni prodotte dagli enti coinvolti in un sistema BMS coerente con le Linee Guide sui ponti esistenti.

Si definiscono quattro gruppi, ognuno dei quali responsabile di determinate azioni all'interno del sistema di gestione di ponti. Il censimento dell'opera viene effettuato dal gruppo attività di censimento, mentre le varie tipologie di ispezione visiva e di indagini in loco vengono eseguite dal gruppo attività di ispezione. Il gruppo attività di valutazione si occupa di eseguire valutazioni preliminari e valutazioni approfondite delle opere e di analizzare i risultati del monitoraggio. Il gruppo di prognosi si occupa di valutare lo stato di degrado della struttura nel tempo al fine di ottimizzare la programmazione degli interventi manutentivi previsti sulle opere.

Il gruppo attività di censimento si occupa di compilare la *scheda di censimento ponti di livello 0*, il cui modello è contenuto nelle Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti. Le informazioni richieste per l'opera sono sintetizzate in figura 5.4.

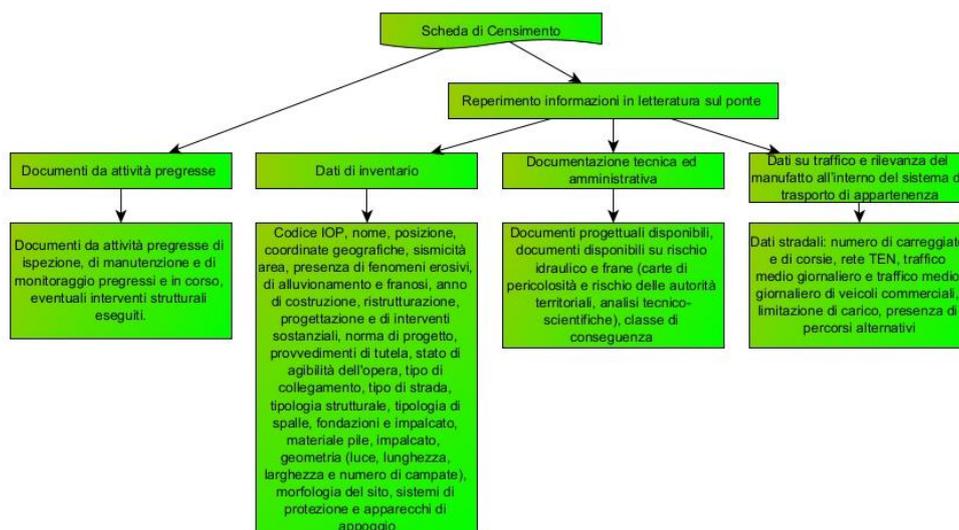


Fig. 5.4 – Contenuto della scheda di censimento ponti di livello 0 prevista nelle Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti.

### 5.3 Diagrammi delle attività previste dalle Linee guida

I diagrammi di flusso utilizzano rettangoli, ovali, diamanti e numerose altre forme per definire il tipo di passaggio, insieme alle frecce di collegamento per definire il flusso e la sequenza<sup>4</sup>. Viene di seguito proposta una schematizzazione delle linee guida suddivisa in processi. Ogni processo è composto da un certo numero di azioni e decisioni, disposte in sequenza. L'attivazione del generico processo si suppone possa essere avviata da azioni eseguite all'interno di altri processi. In figura 5.5 sono rappresentate le convenzioni utilizzate per la realizzazione dei diagrammi di flusso, necessarie alla loro interpretazione.

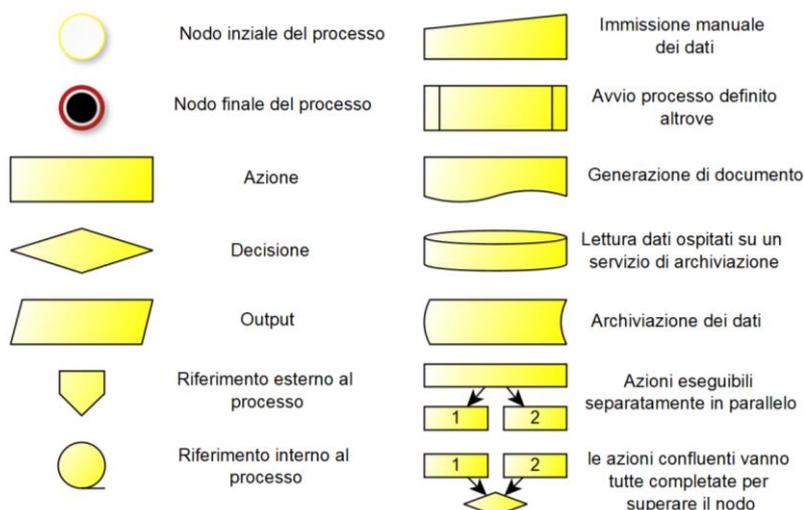


Fig. 5.5 - Convenzioni utilizzate per la realizzazione dei diagrammi di flusso.



### **5.3.1 Elenco complessivo dei processi**

Sono stati realizzati un totale di diciotto processi, alcuni dei quali interconnessi tra loro, altri completamente indipendenti. Per processo si intende una sequenza di azioni relative ad una specifica attività, come ad esempio l'ispezione ordinaria di ponti esistenti. L'avvio di ogni processo può avvenire all'avvio del sistema di gestione o può essere attivato da determinate azioni presenti in altri processi. Alcune azioni previste all'interno di determinati processi necessitano, per il loro avanzamento, di informazioni provenienti da altri processi, senza le quali non è possibile il loro completamento. Alcuni processi non hanno nodo terminale in quanto vengono iterati ciclicamente, cioè tenuti in esecuzione per un tempo indefinito. Per ogni processo sono definite le seguenti informazioni:

- Le attività che ne consentono l'avvio, se presenti.
- La sequenza di attività che lo compone.
- I requisiti necessari per l'avvio di ogni attività che lo compone.
- L'ente che esegue l'attività e che la approva.
- L'ente che può decidere la chiusura del processo.
- L'eventuale necessità di rendere disponibile materiale al ministero delle infrastrutture o di stoccare nel sistema di gestione di ponti le informazioni acquisite.



Sono di seguito riassunti i diciotto processi realizzati, suddivisi in sette gruppi in base alla loro specifica finalità. In figura 5.6 e figura 5.7 si rappresenta il titolo di ogni processo e vengono indicate le attività che ne consentono l'avvio.

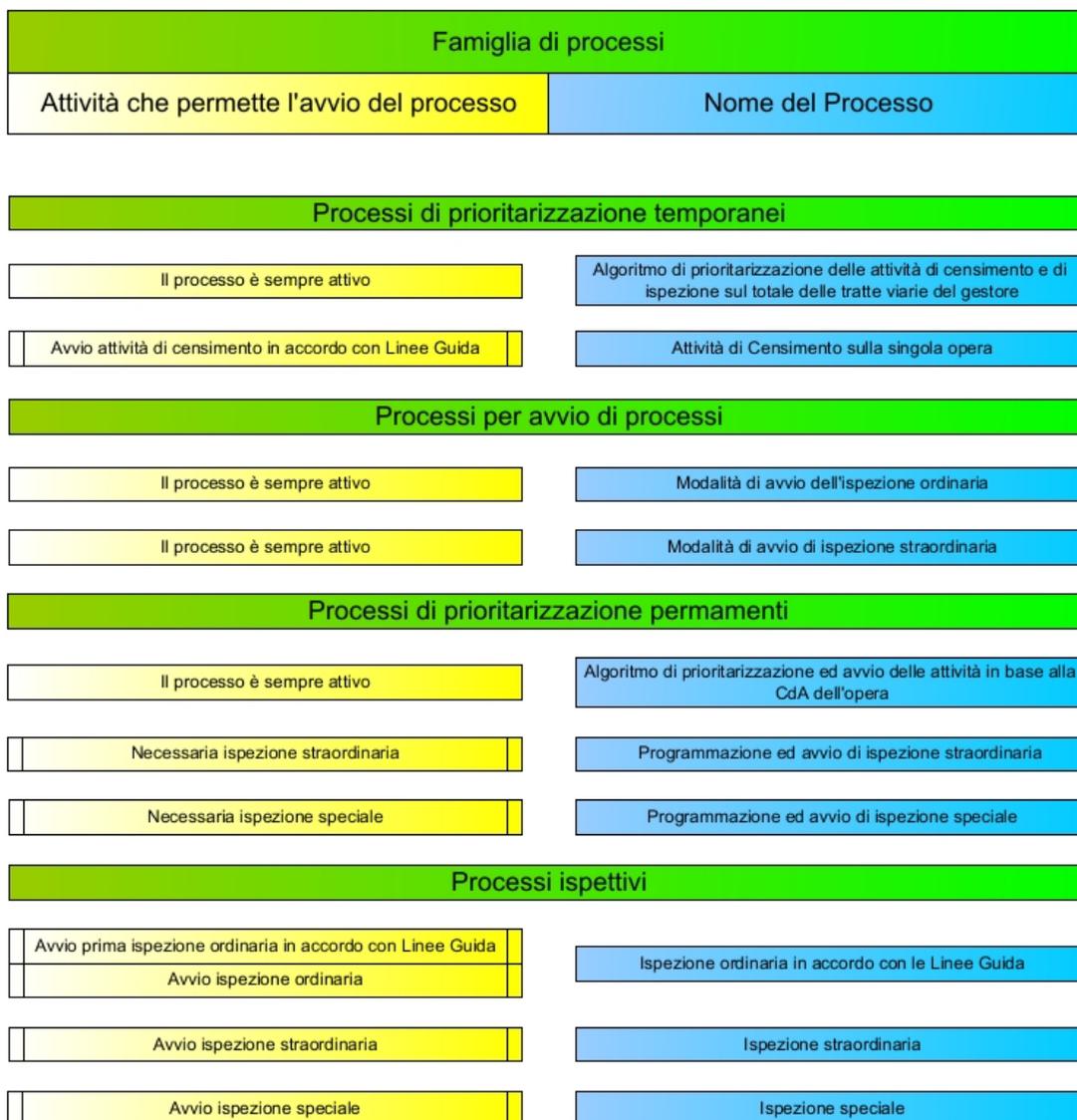


Fig. 5.6 – Titoli dei processi che descrivono l'applicazione delle Linee guida sui ponti esistenti ed attività che ne consentono l'avvio.

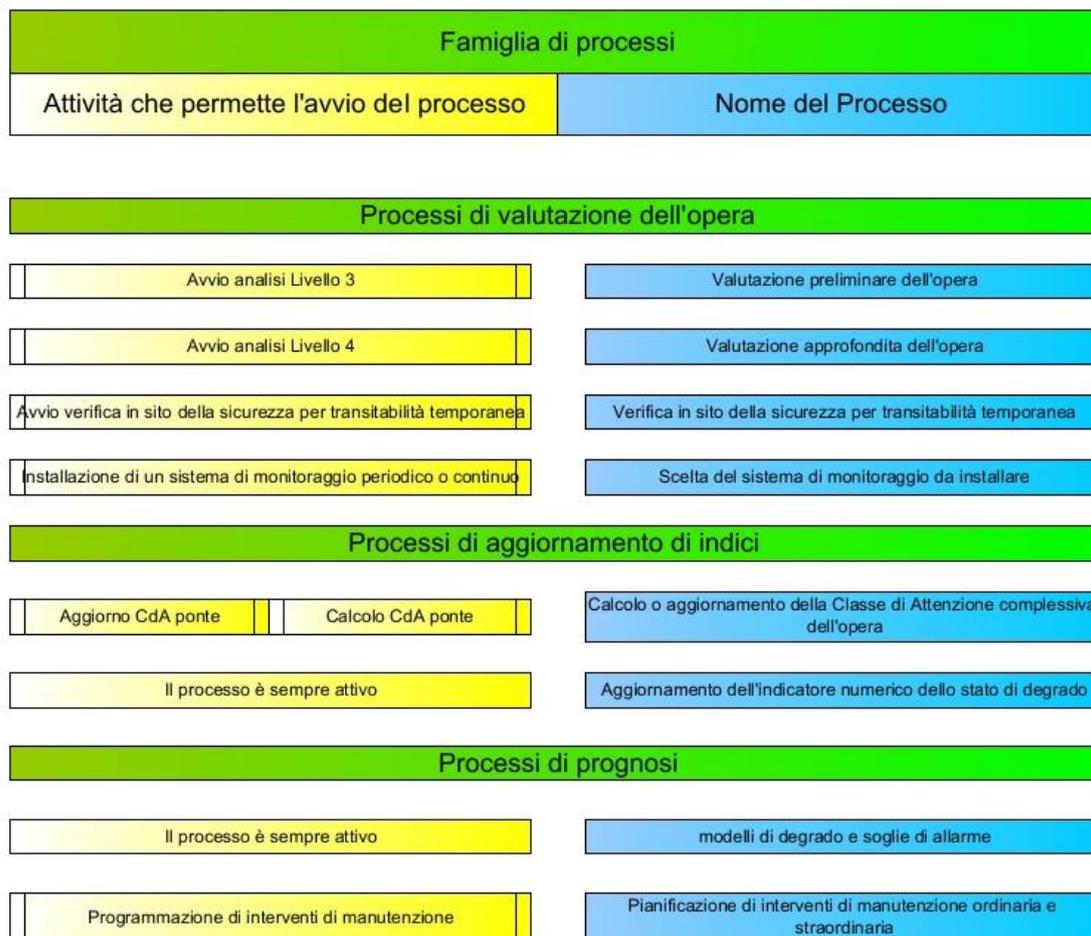


Fig. 5.7 – Titoli dei processi che descrivono l'applicazione delle Linee guida sui ponti esistenti ed attività che ne consentono l'avvio.

I *processi di prioritizzazione temporanei* definiscono l'ordine di avvio della fase di censimento e della prima ispezione ordinaria eseguita in accordo con Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti. Tali processi terminano una volta completate queste due fasi per ogni opera dell'ente gestore. I *processi per avvio di processi* consentono, se si verificano una serie di condizioni, di segnalare la necessità di avviare processi di ispezione ordinaria o straordinaria. L'avvio di un qualsiasi processo ispettivo è subordinato alla decisione del gestore, in base alla sua pianificazione degli investimenti. Sulla base di ciò, i *processi di prioritizzazione permanenti* definiscono un ordine di priorità dei processi e ne consentono l'avvio. I *processi di prioritizzazione permanenti* consentono quindi di avviare i processi appartenenti alle famiglie di *processi ispettivi* e di *processi di valutazione dell'opera*.

I processi appartenenti alla famiglia di *processi di aggiornamento di indici* consentono di calcolare periodicamente la classe di attenzione e l'indice numerico dello stato di degrado dell'opera e di ogni sua parte. Questi due valori sono utilizzati rispettivamente nel processo chiamato "*algoritmo di*



*prioritarizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell'opera” e nella famiglia di processi di prognosi.*

La famiglia dei *processi di prognosi* si occupa di modellare degrado ed affidabilità della struttura nel tempo, utilizzati rispettivamente per definire delle soglie di allarme e programmare gli interventi manutentivi.

### **5.3.2 Interdipendenza tra i processi**

Come già detto precedentemente, l'avvio di ogni processo può avvenire in diversi modi. Alcuni processi sono avviati all'avvio del sistema di gestione e rimangono sempre in esecuzione, mentre altri possono essere avviati soltanto da azioni contenute all'interno di altri processi. Nella seguente trattazione il legame tra processi tra loro dipendenti è rappresentato mediante frecce continue con verso rivolto al processo che può essere avviato.

Inoltre, alcune azioni previste all'interno di determinati processi necessitano, per il loro avanzamento, di informazioni provenienti da altri processi. Nella seguente trattazione la dipendenza di tipo debole appena definita è indicata da frecce puntinate con verso rivolto al processo che necessita delle informazioni.

In figura 5.7 sono mostrate le relazioni esistenti, di tipo forte e debole, tra i differenti processi.

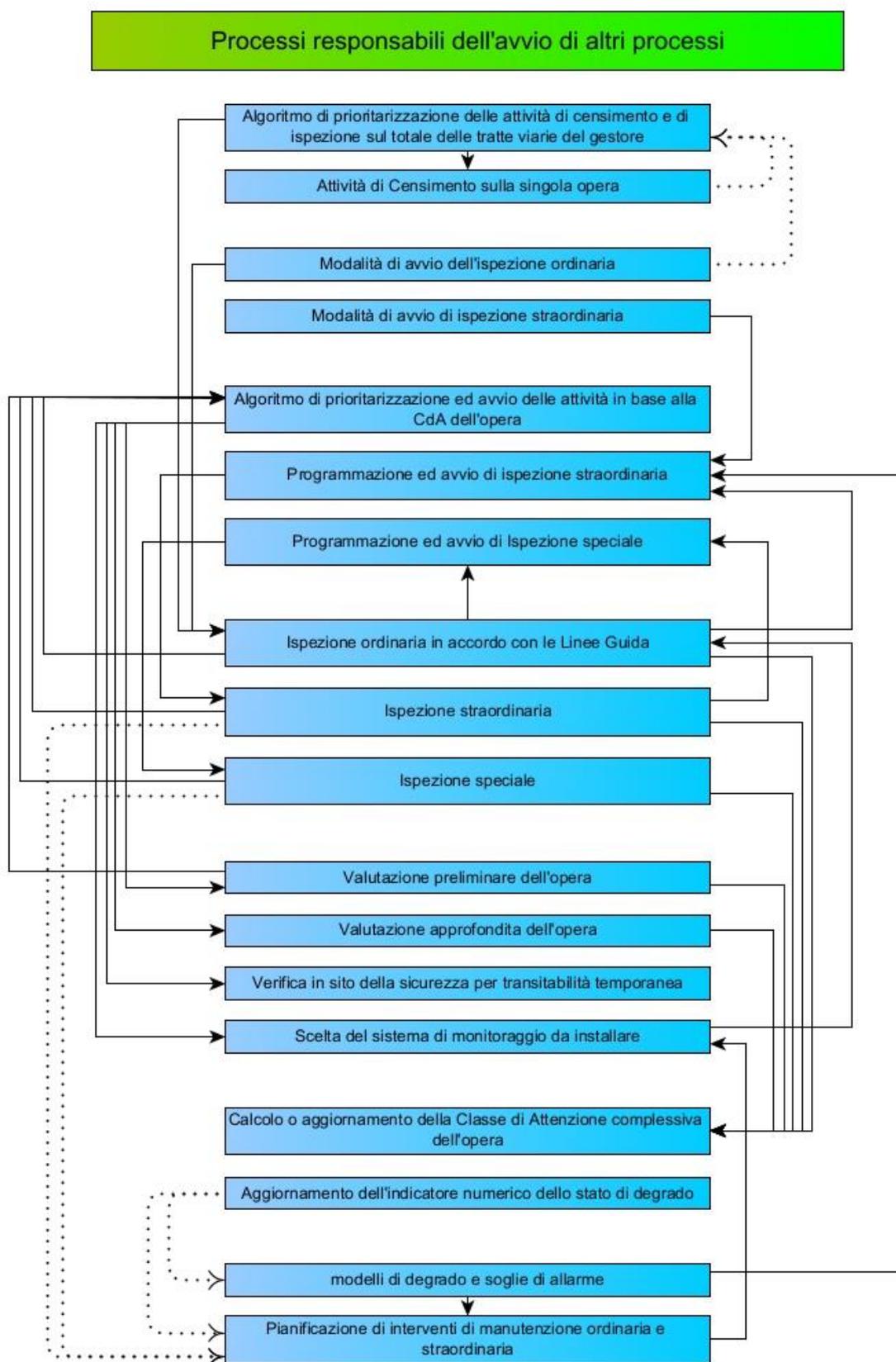


Fig. 5.7 – Relazioni di tipo forte e di tipo debole che intercorrono tra i processi.



### **5.3.3 Processo di prioritizzazione temporanea delle attività**

Il processo dal titolo “Algoritmo di prioritizzazione delle attività di censimento e di ispezione sul totale delle tratte viarie del gestore” consente al gestore di stabilire un ordine di priorità, anche in assenza di tutte le informazioni di censimento delle opere, per l’avvio delle fasi di censimento e di prima ispezione ordinaria eseguita in accordo con Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti. Il processo permette di individuare le tratte viarie in cui le fasi di censimento e di prima ispezione ordinaria sono da analizzare prioritariamente, consentendone l’avvio, previa approvazione del gestore. Tale processo, per stabilire l’ordine di priorità, utilizza anche informazioni provenienti da due differenti processi. In particolare, l’avvio della fase ispettiva è prioritario per le opere con soddisfacente stato di avanzamento della fase di censimento e per le opere che non vengono ispezionate da più di due anni. Tale processo consente di avviare processo “Attività di Censimento sulla singola opera” e “Ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida”. Il processo termina quando i due processi appena definiti vengono avviati e completati per ogni opera dell’ente gestore.



In Figura 5.8 viene schematizzato il processo e le attività di cui è composto.

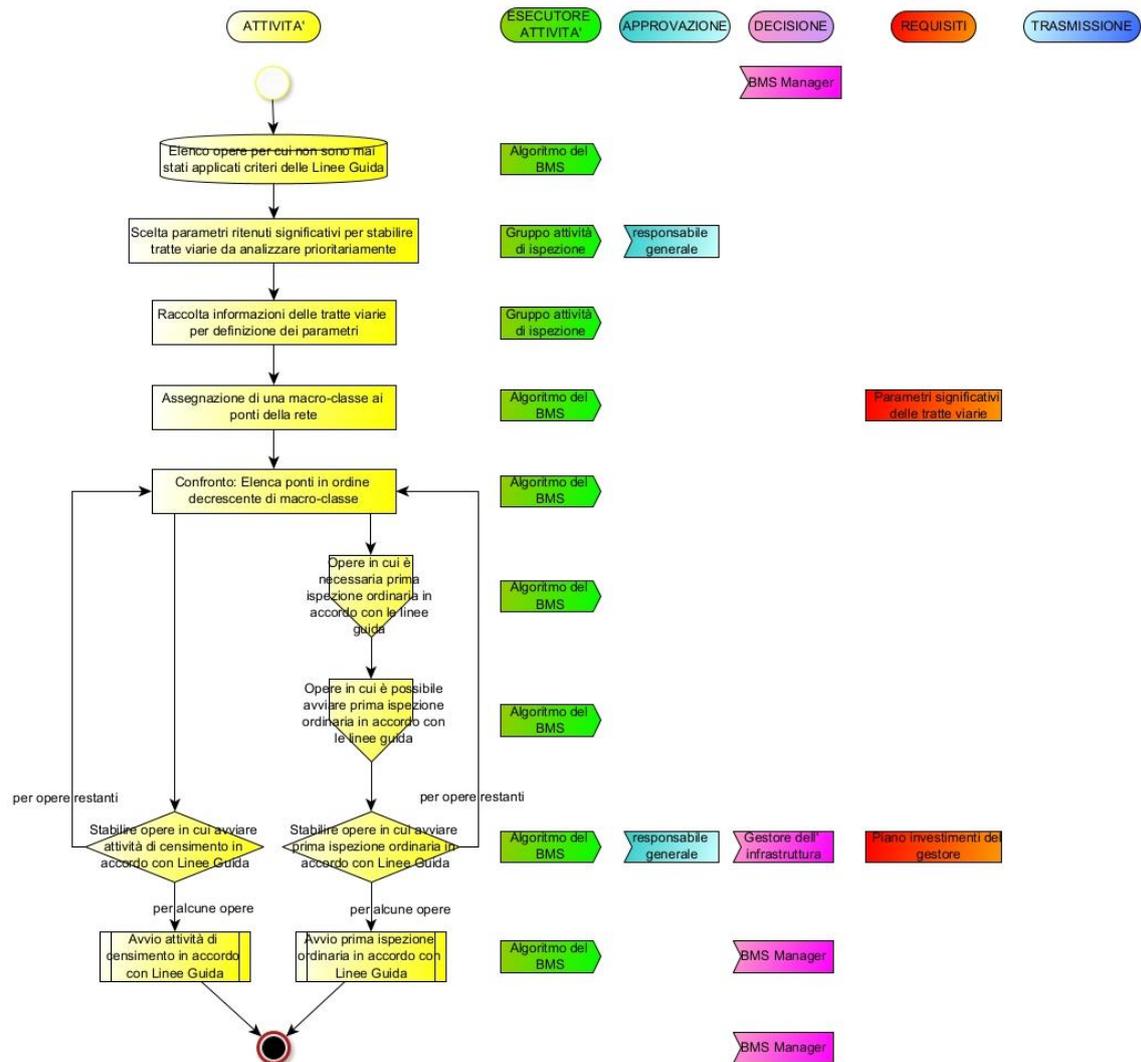


Figura 5.8 - Processo “Algoritmo di prioritizzazione delle attività di censimento e di ispezione sul totale delle tratte viarie del gestore”.

Il processo prevede l’assegnazione di una “macro-classe” ad ogni opera, necessaria per definire un ordine di esecuzione delle attività in assenza della Classe di Attenzione.



### 5.3.4 Censimento dell'opera

Il processo "Attività di Censimento sulla singola opera" riguarda i ponti per i quali ho appena avviato fase di censimento ed è definito in figura 5.9.

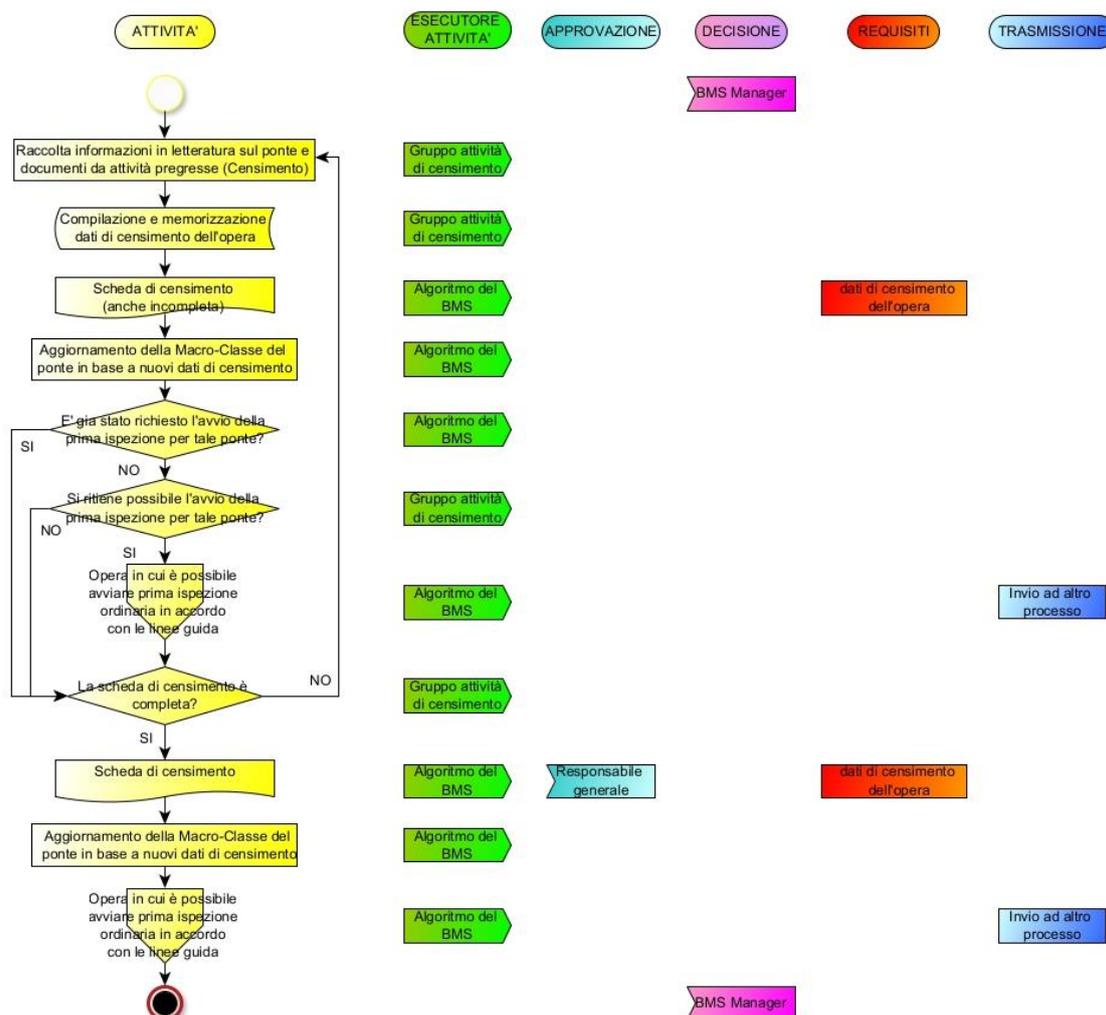


Fig. 5.9 – Processo "Attività di Censimento sulla singola opera".

Il processo prevede l'invio di informazioni ad altro processo, qualora si ritenga che lo stato di avanzamento della fase di censimento dell'opera sia soddisfacente. In particolare, il ciclo contenuto nel processo consente al gruppo di attività di censimento di richiedere l'avvio della fase ispettiva, indipendentemente dal completamento della scheda di censimento. Completata la scheda di censimento il ciclo termina e viene reso possibile l'avvio della fase ispettiva, qualora non fosse già stato fatto.



### **5.3.5 Processi di avviamento delle ispezioni**

Vengono di seguito descritti i due processi che consentono di stabilire quando è richiesta l'esecuzione di un'ispezione ordinaria o straordinaria.

Il processo "Modalità di avvio dell'ispezione ordinaria" consente di stabilire quando è possibile avviare l'ispezione ordinaria per una data opera. Esso è valido sia per opere con classe di attenzione assegnata sia per opere che ne sono ancora sprovviste.

In particolare, l'azione "Necessaria prima ispezione ordinaria in accordo con le linee guida" permette di aggiungere il ponte all'elenco di opere in cui va avviata la prima ispezione ordinaria in accordo con le linee guida.

Inoltre, quando per opere provviste di CdA viene superata la frequenza minima di ispezione viene avviato il processo "ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida", previa approvazione del gestore.



Il processo “Modalità di avvio dell'ispezione ordinaria” è definito in figura 5.10.

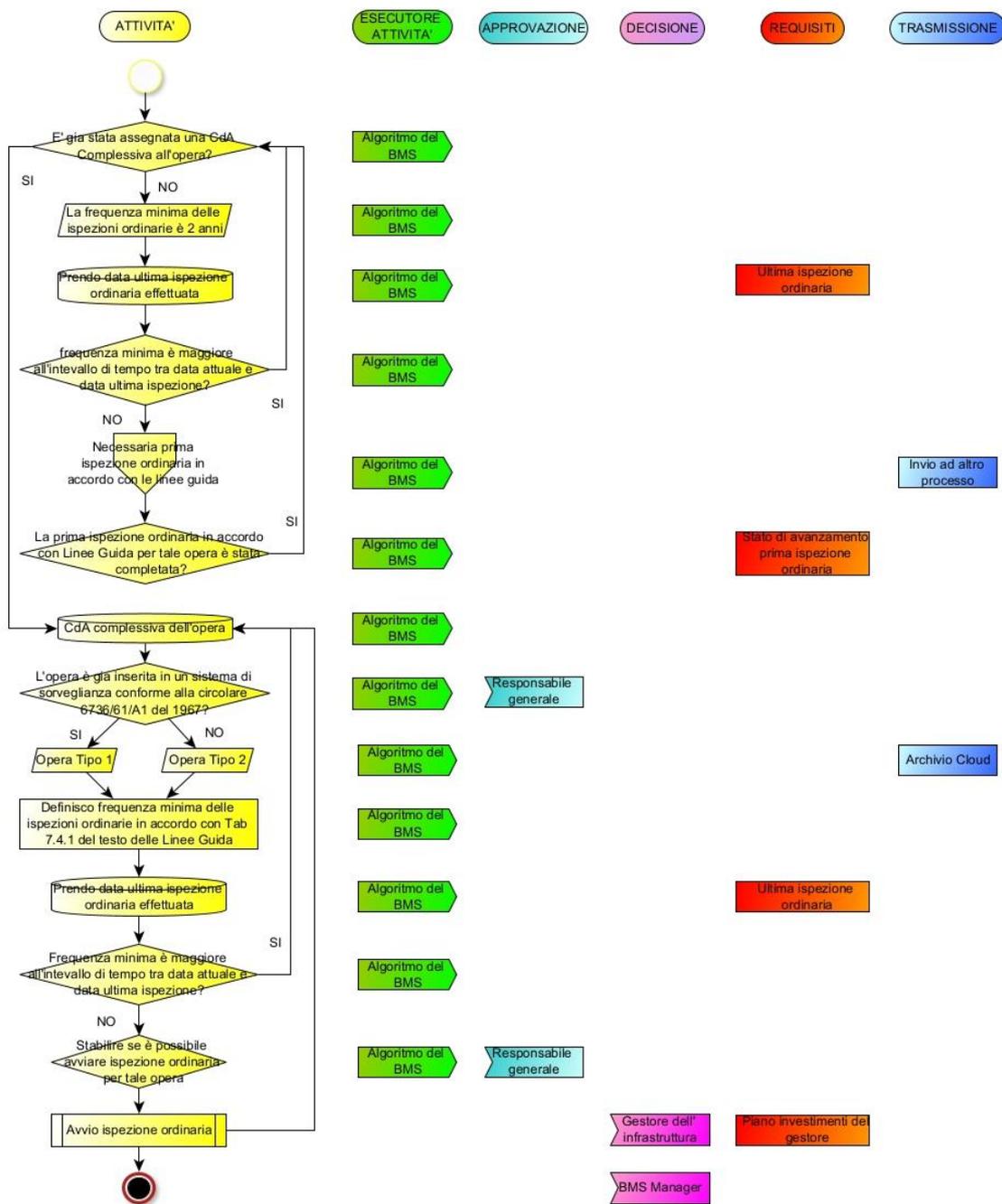


Fig. 5.10 – Processo “Modalità di avvio dell'ispezione ordinaria”.



Il processo “Modalità di avvio di ispezione straordinaria” permette di segnalare quando è necessario eseguire un'ispezione straordinaria. L'avvio della stessa viene poi stabilito in un successivo processo, sulla base del totale di ispezioni richieste e del piano di investimenti del gestore. In particolare, la necessità viene segnalata al verificarsi di eventi eccezionali o di anomalie nei modelli di prognostici della struttura. Il processo è rappresentato in figura 5.11.

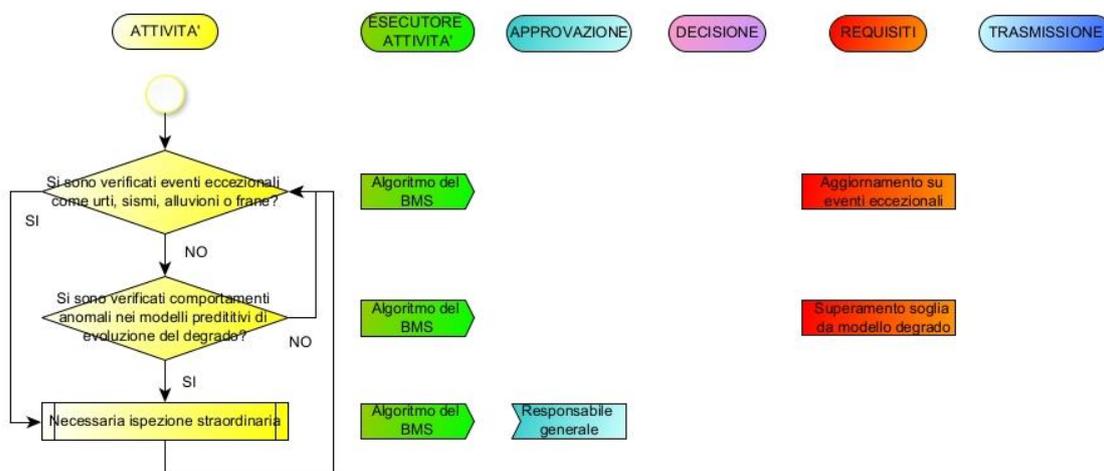


Fig. 5.11 – Processo “Modalità di avvio di ispezione straordinaria”.

### 5.3.6 Processi di prioritizzazione permanenti delle attività

Vengono di seguito descritti i tre processi che permettono, sulla base del piano di investimenti del gestore, di decidere se avviare o meno processi di tipo ispettivo o di valutazione dell'opera:

- Algoritmo di prioritizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell'opera
- Programmazione ed avvio di Ispezione straordinaria
- Programmazione ed avvio di Ispezione speciale

Il processo “Algoritmo di prioritizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell'opera” permette di gestire l'avvio di uno o più processi appartenenti alla famiglia “processi di valutazione dell'opera”.

Tale processo richiede generalmente informazioni provenienti dal processo “Calcolo o aggiornamento della Classe di Attenzione complessiva dell'opera”. In alcuni casi quest'ultimo processo non è richiesto: nel caso in cui processi differenti assegnino autonomamente un valore di CdA del ponte, senza che venga effettivamente calcolata, tale passaggio non è richiesto.



Il processo è rappresentato in figura 5.12.

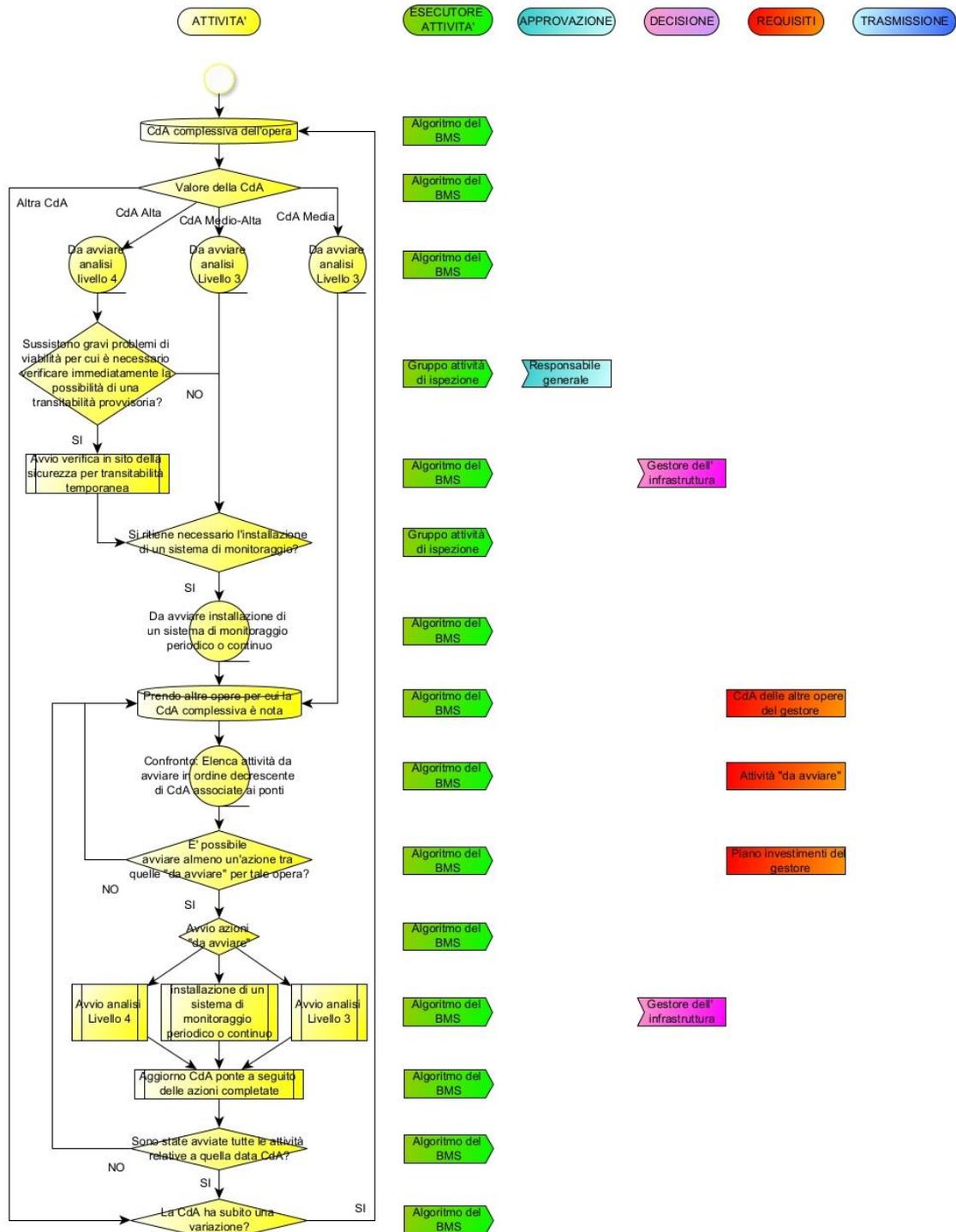


Fig. 5.12 – Processo “Algoritmo di prioritizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell'opera”.



Il processo “Programmazione ed avvio di Ispezione straordinaria” riguarda un’opera per cui è stata segnalata la necessità di eseguire un’ispezione straordinaria. Il processo consiste nella definizione di un ordine di priorità per tutte le richieste di esecuzione di ispezioni straordinarie relative all’intera rete del gestore. L’effettivo avvio dell’ispezione straordinaria per l’opera corrente è gestito da tale processo in base al piano di investimenti del gestore ed è mostrato in figura 5.13.

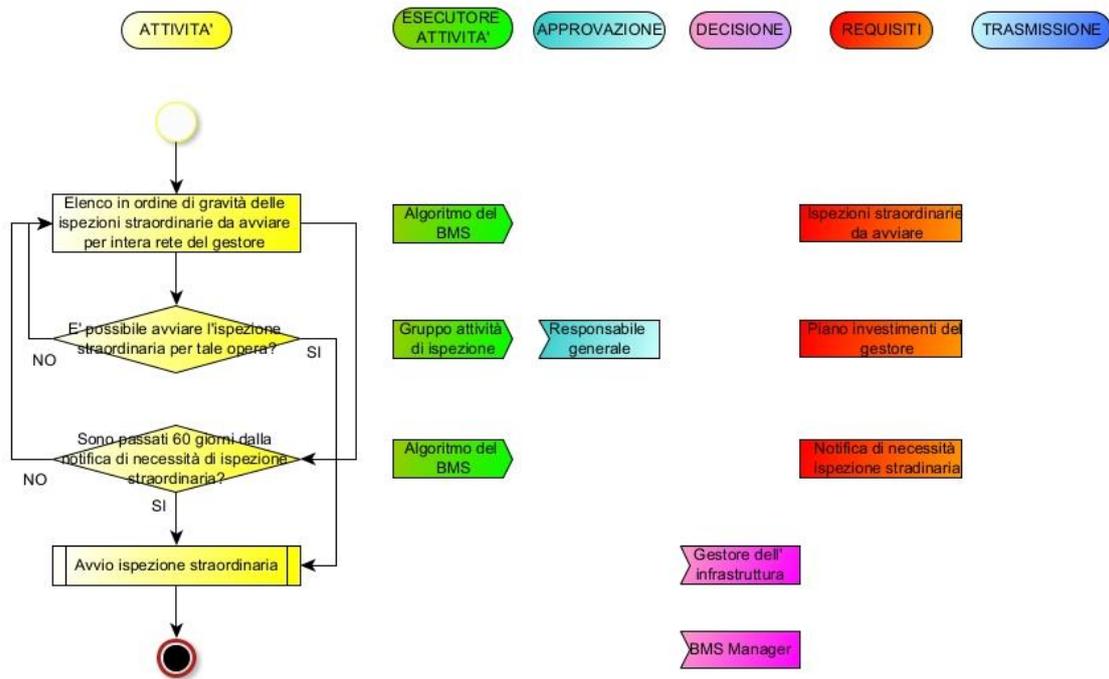


Fig 5.13 - Processo “Programmazione ed avvio di Ispezione straordinaria”.

L’avvio è reso necessario qualora si superino 60 giorni dalla data di notifica della necessità dell’ispezione straordinaria. Il processo termina quando l’ispezione straordinaria richiesta per l’opera in esame viene completata.



Il processo “Programmazione ed avvio di ispezione speciale” consente di avviare il processo “Avvio ispezione speciale” per una qualsiasi opera. Il processo raccoglie tutte le richieste di esecuzione di ispezioni speciali relative l’intera rete del gestore, e ne stabilisce un ordine di priorità. Il momento in cui essa viene avviata dipende dalla programmazione del gestore. Il processo termina al suo avvio e completamento. Il processo è rappresentato in figura 5.14.

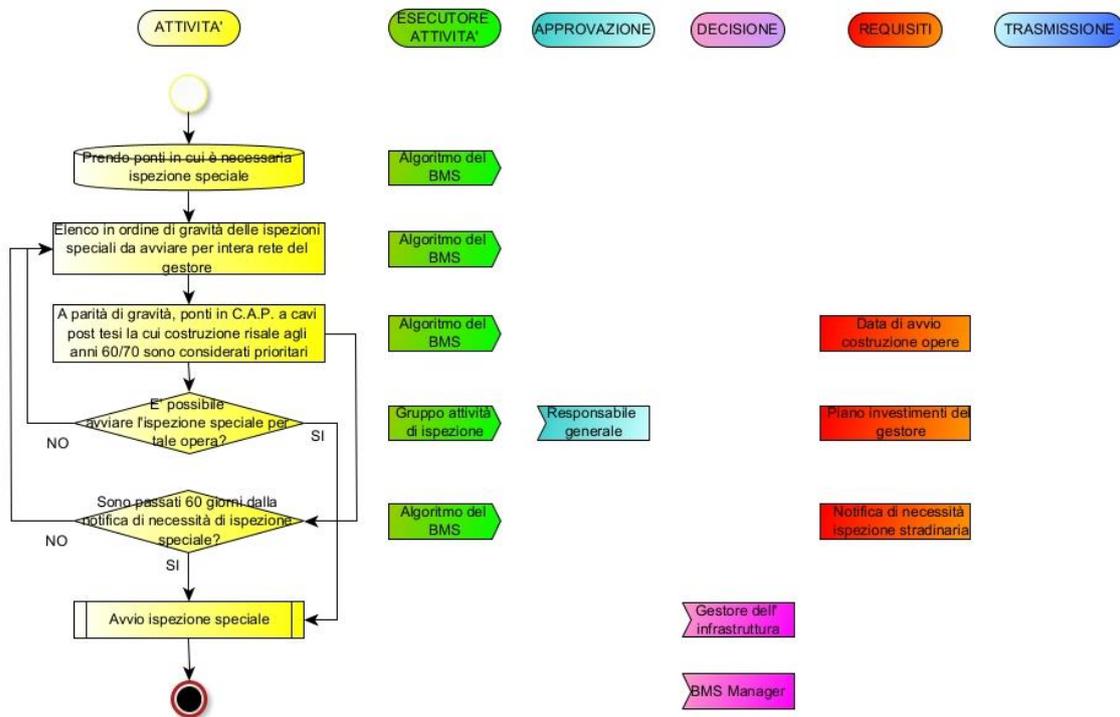


Fig. 5.14 – Processo “Programmazione ed avvio di ispezione speciale”.

Anche in questo caso, il processo termina quando l’ispezione speciale richiesta per l’opera in esame viene completata.



### **5.3.7 Processi ispettivi**

Vengono qui descritti i tre processi ispettivi previsti dalle Linee Guida sui ponti esistenti: Ispezione ordinaria, straordinaria e speciale.

Il processo “Ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida” riguarda i ponti per quali è stata avviata la prima ispezione ordinaria secondo Linee Guida o qualsiasi ispezione ordinaria successiva. Sono altresì definite le corrispondenti azioni in base ai risultati ottenuti dall’ispezione. Tale processo può essere avviato da una qualsiasi dei seguenti processi: Algoritmo di prioritizzazione delle attività di censimento e di ispezione sul totale delle tratte viarie del gestore, Modalità di avvio dell’ispezione ordinaria, Scelta del sistema di monitoraggio da installare.

Tale processo può consentire l’avvio di quattro differenti processi: Calcolo o aggiornamento della Classe di Attenzione complessiva dell’opera, Programmazione ed avvio di ispezione straordinaria, Programmazione ed avvio di ispezione speciale, Algoritmo di prioritizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell’opera. Quest’ultimo viene avviato nel caso in cui si ritenga necessario l’avvio immediato di indagini di livello 4. Il processo termina quando, in base ai risultati ottenuti dall’ispezione, sono stati avviati tutti i processi resi necessari.



Il processo è mostrato in figura 5.14.

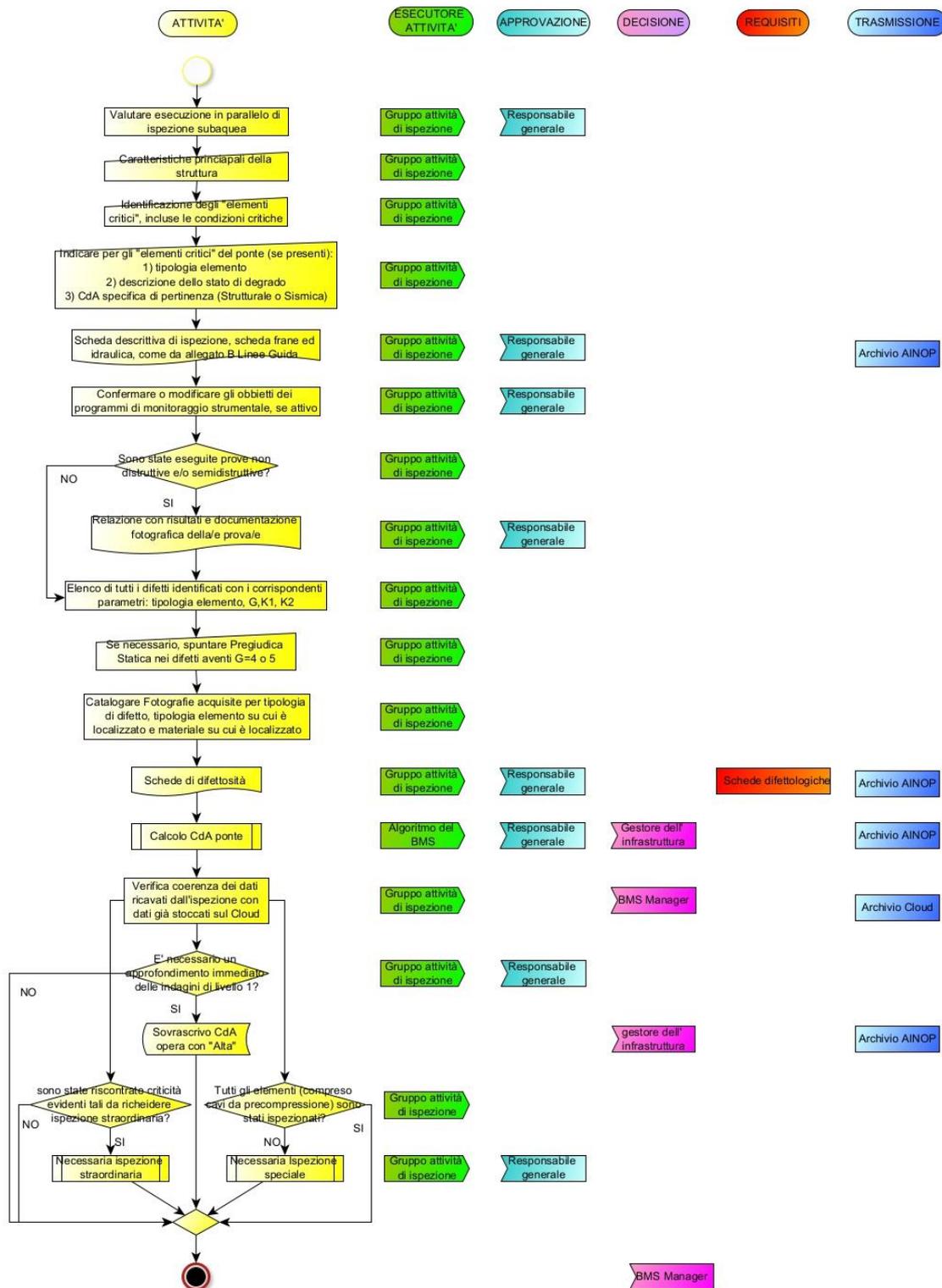


Fig. 5.14 - Processo "Ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida".



Il processo “Ispezione straordinaria” consiste nello svolgimento degli step previsti in una generica ispezione straordinaria, compreso la valutazione delle azioni conseguenti in base ai risultati ottenuti. Il processo è mostrato in figura 5.15.

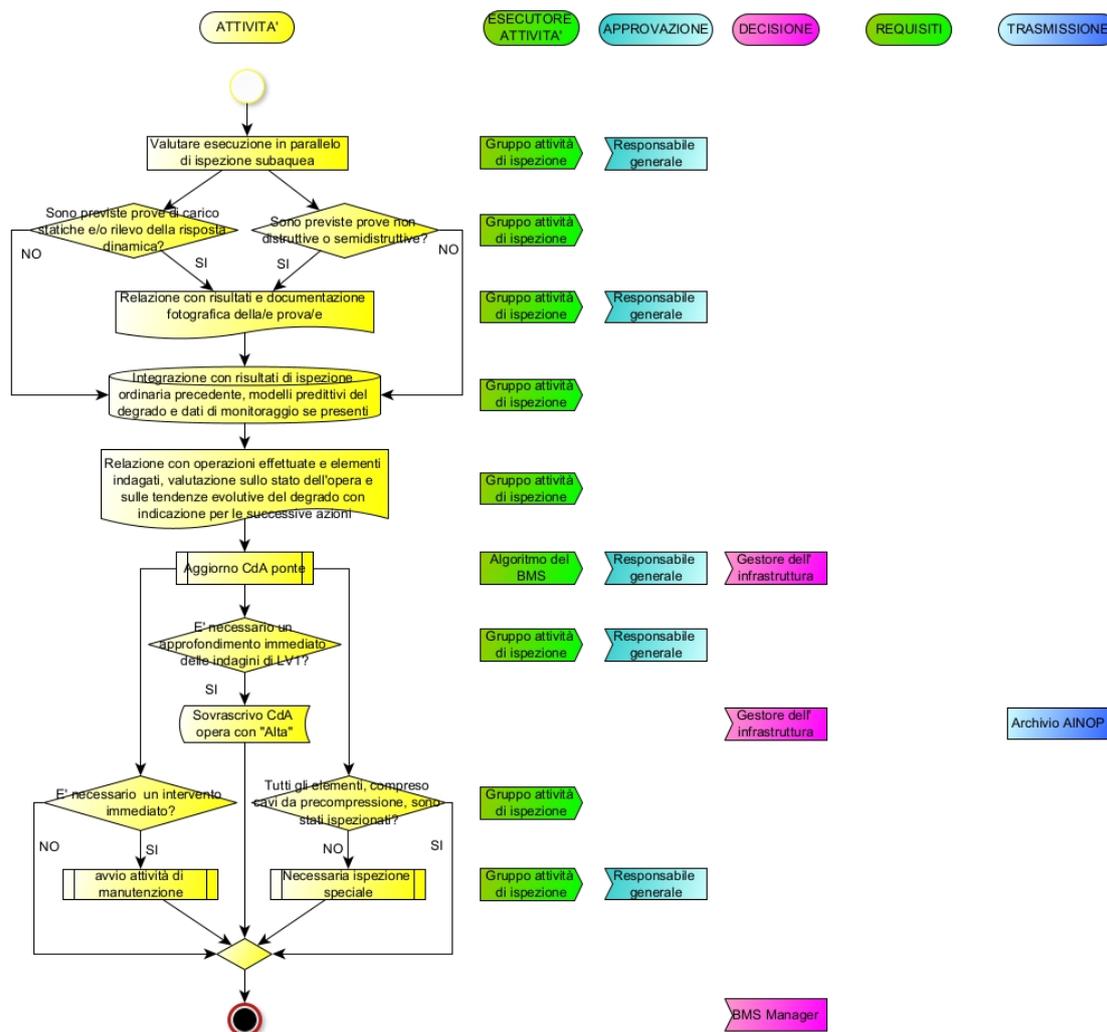


Fig. 5.15 – Processo “Ispezione straordinaria”.

Tale tipologia di ispezione richiede la compilazione di un documento che integra i risultati della precedente ispezione ordinaria, dei modelli predittivi del degrado e dei dati di monitoraggio se presenti. Conseguentemente, vengono utilizzate informazioni provenienti da altri processi, se presenti.

Il processo “Ispezione speciale” si attiva quando l’avvio dell’ispezione speciale per quel dato ponte viene approvata. Cioè tale processo è subordinato al processo “Programmazione ed avvio di Ispezione straordinaria”.

Come nelle ispezioni ordinarie, anche qui il processo termina quando, in base ai risultati ottenuti dall’ispezione, sono stati avviati tutti i processi resi necessari.



Il processo “Ispezione speciale”, analogamente a quanto visto per le altre tipologie ispettive, riguarda le fasi in cui si svolge una generica ispezione speciale in accordo con le Linee Guida. Il processo è mostrato in figura 5.16.

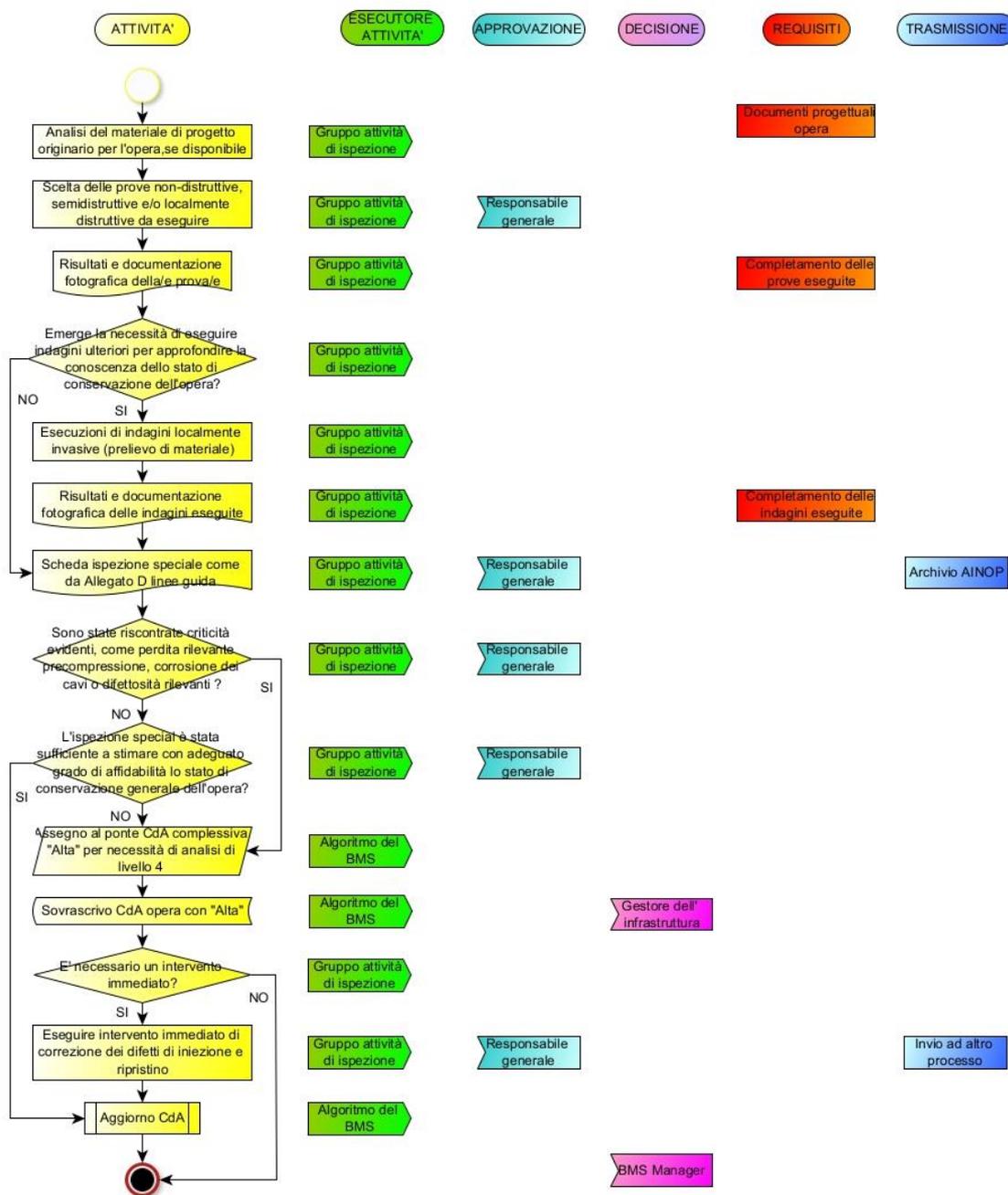


Fig. 5.16 – Processo “Ispezione speciale”.

In tale processo può essere richiesto un immediato intervento di manutenzione, il cui avvio viene gestito dal processo “Pianificazione di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria”.



### **5.3.8 Processi di valutazione dell'opera**

Sono di seguito descritti i quattro processi relativi a valutazioni di carattere strutturale delle opere:

- Valutazione preliminare dell'opera
- Valutazione approfondita dell'opera
- Verifica in sito della sicurezza per transitabilità temporanea
- Scelta del sistema di monitoraggio da installare

Il processo "Valutazione preliminare dell'opera" è composto dalle azioni che caratterizzano le analisi preliminari di livello 3 previste dalle Linee Guida e le azioni conseguenti. Consente di stabilire, anche sulla base della tipologia e qualità dei difetti riscontrati in ispezioni passate e di monitoraggi pregressi, la necessità di eseguire valutazioni accurate di livello 4 o di installare un sistema di monitoraggio.

Se gli enti responsabili di tale attività lo ritengono necessario, è possibile richiedere una valutazione di livello 4 attraverso uno scalo della CdA dell'opera a valore "Alta", oppure richiede l'installazione di un sistema di monitoraggio attraverso uno scalo a "Medio-alta".



Tale attività non determina l'avvio di nessun'altra attività, ma determina l'avvio di attività come conseguenza dell'attività "Algoritmo di prioritizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell'opera". Il processo è mostrato in figura 5.17.



Fig. 5.17 – Processo "Valutazione preliminare dell'opera".

Il processo "Valutazione approfondita dell'opera" è composto dalle azioni che caratterizzano le analisi di livello 4 previste dalle Linee Guida e le azioni conseguenti. In particolare, la valutazione del livello di sicurezza per azioni non sismiche consente di assegnare la condizione di ponte adeguato, operativo o transitabile. In base alla condizione assegnata, può essere necessario ripetere la valutazione della sicurezza, modificare l'uso del ponte, eseguire gli interventi necessari oppure eseguire la chiusura al traffico.





Il processo “Verifica in sito della sicurezza per transitabilità temporanea” rappresenta i passaggi di un’analisi di transitabilità. Si tratta di analisi strutturali locali di ponti e viadotti aventi validità limitate al tempo necessario alla risoluzione della problematica riscontrata o all’esecuzione dell’intervento resosi necessario. Il processo viene avviato dal processo “Algoritmo di prioritarizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell’opera”. Ciò succede quando viene assegnata all’opera una CdA alta e sussistono gravi problemi di viabilità per cui è necessario verificare immediatamente la possibilità di una transitabilità provvisoria. Tale processo avviene contestualmente all’avvio di una analisi di livello 4, rappresentata dal processo “Valutazione approfondita dell’opera”.



Il processo considera lo stato di avanzamento dell'analisi di livello 4, sulla base del quale vengono definite le azioni conseguenti, ed è mostrato in figura 5.19.



Fig. 5.19 – Processo “Verifica in sito della sicurezza per transitabilità temporanea”.



Il processo “Scelta del sistema di monitoraggio da installare” riguarda il progetto, l’installazione e la gestione di un sistema di monitoraggio. Le linee guide non obbligano l’installazione di uno Structural Health Monitoring (SHM) ma lo consigliano per ponti con CdA Alta o Medio-alta o nel caso si voglia valutare un eventuale intervento di manutenzione eseguito.

Il processo definisce la cadenza con la quale viene rilasciato il rapporto periodico del monitoraggio e consente l’avvio di un’ispezione qualora vengano individuate anomalie di una certa importanza sull’opera. Il processo è mostrato in figura 5.20.

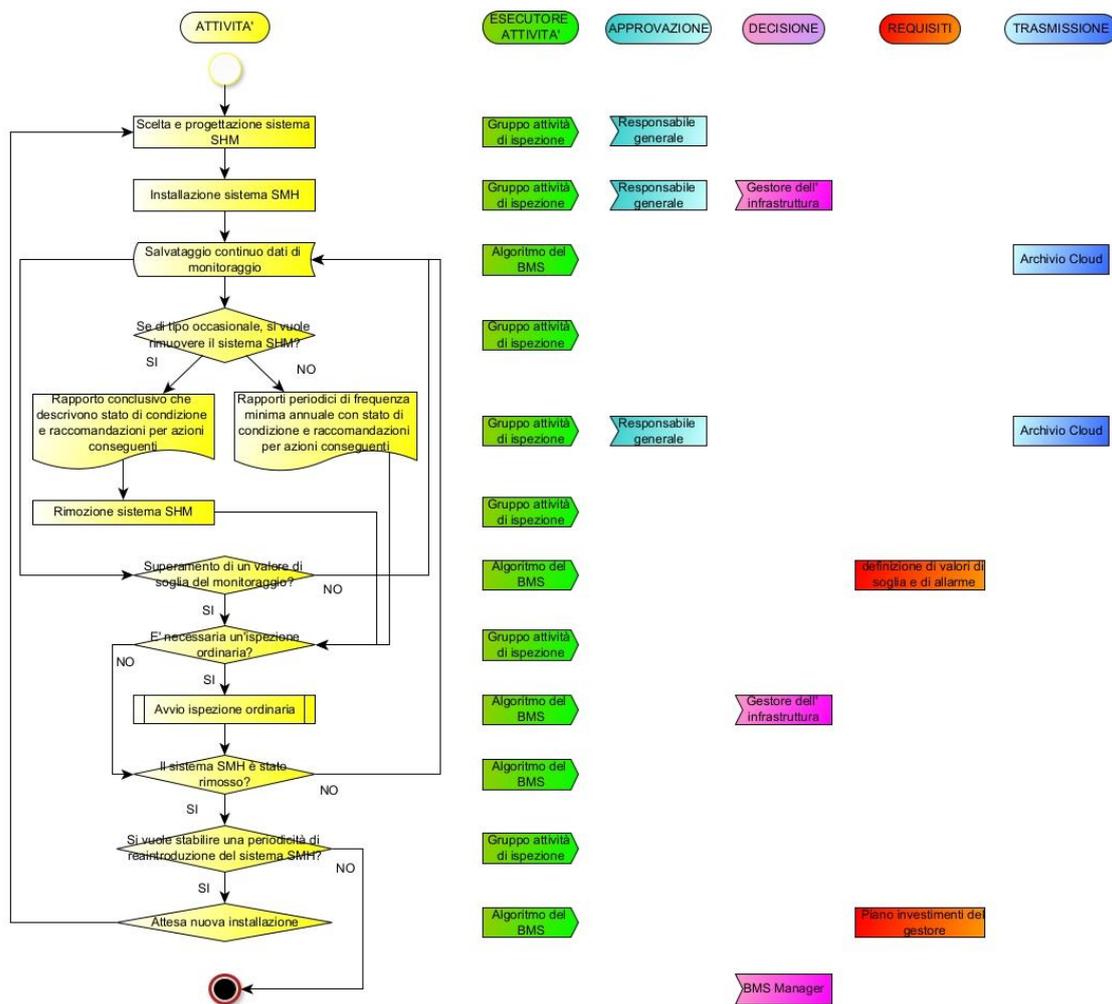


Fig. 5.20 – Processo “Scelta del sistema di monitoraggio da installare”.



### 5.3.9 Processi di aggiornamento di indici

Sono di seguito descritti i due processi che prevedono calcolo ed aggiornamento di indici di condizione del ponte: Calcolo o aggiornamento della Classe di Attenzione complessiva dell'opera, Aggiornamento dell'indicatore numerico dello stato di degrado. Il processo "Calcolo o aggiornamento della Classe di Attenzione complessiva dell'opera" consente, attraverso passaggi di tipo software, di calcolare la CdA complessiva dell'opera nel momento in cui viene richiesta. Il calcolo della CdA va eseguito periodicamente oppure in seguito al completamento di attività che possono determinare una variazione della CdA stessa. Il processo è mostrato in figura 5.21.

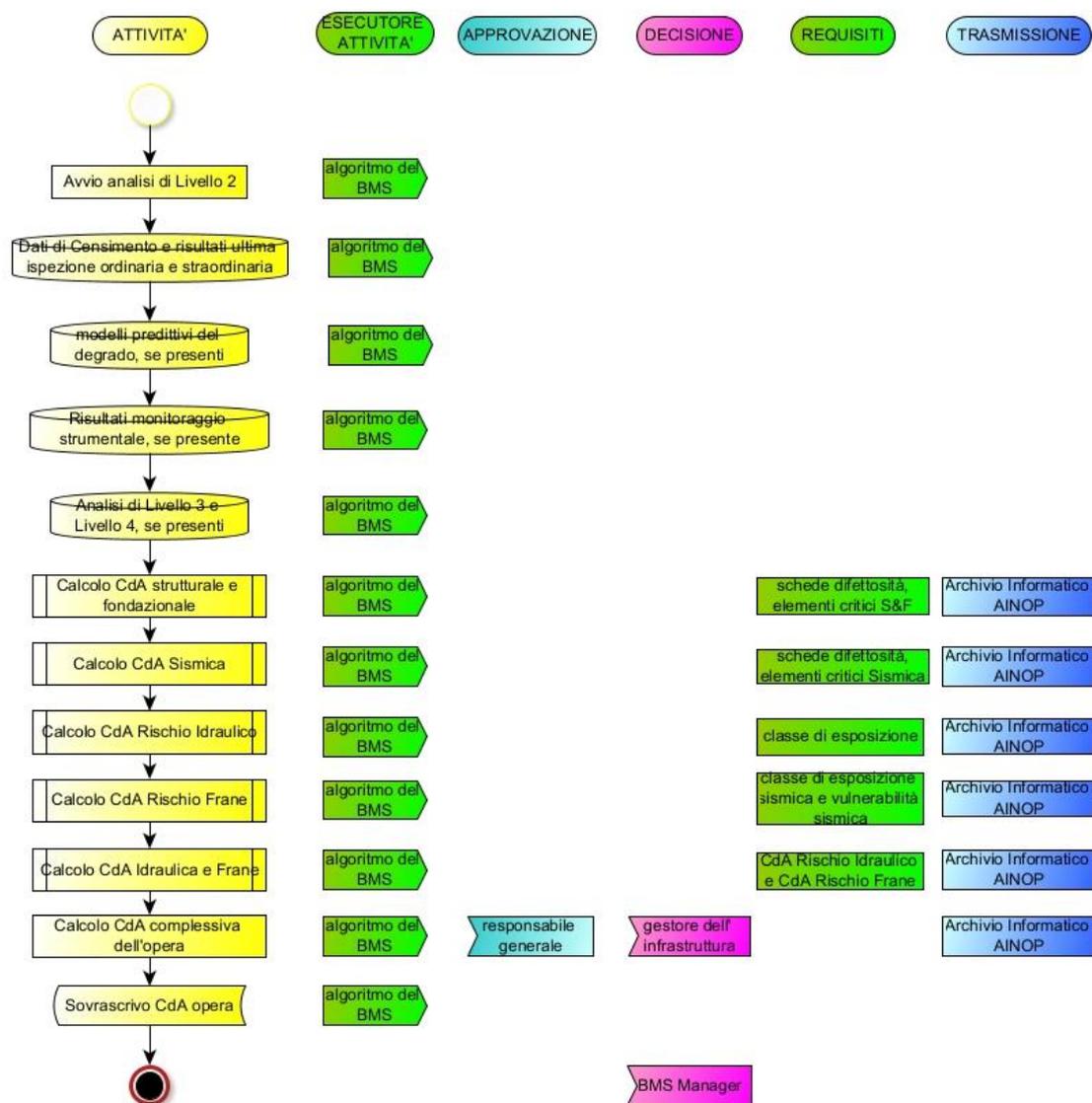


Fig. 5.21 – Processo "Calcolo o aggiornamento della Classe di Attenzione complessiva dell'opera".



Tale processo risulta fondamentale al fine di una corretta programmazione delle azioni, come previsto nel processo “Algoritmo di prioritizzazione ed avvio delle attività in base alla CdA dell'opera”. Il calcolo delle quattro singole CdA consiste in quattro sottoprocessi, a loro volta composti da una serie di azioni.

Il processo “Aggiornamento dell'indicatore numerico dello stato di degrado” permette di calcolare, sulla base principalmente della scheda di difettosità più recente disponibile, un indice numerico che descrive la condizione della struttura dal punto di vista del degrado. Tale indice viene tenuto costantemente aggiornato in quanto viene utilizzato nei modelli di degrado per pianificare interventi di manutenzione ed altre azioni correttive e/o preventive. Conseguentemente, tale processo risulta sempre attivo e viene utilizzato all'interno dei processi “modelli di degrado e soglie di allarme” e “modelli di degrado e soglie di allarme”. Il processo è mostrato in figura 5.22.

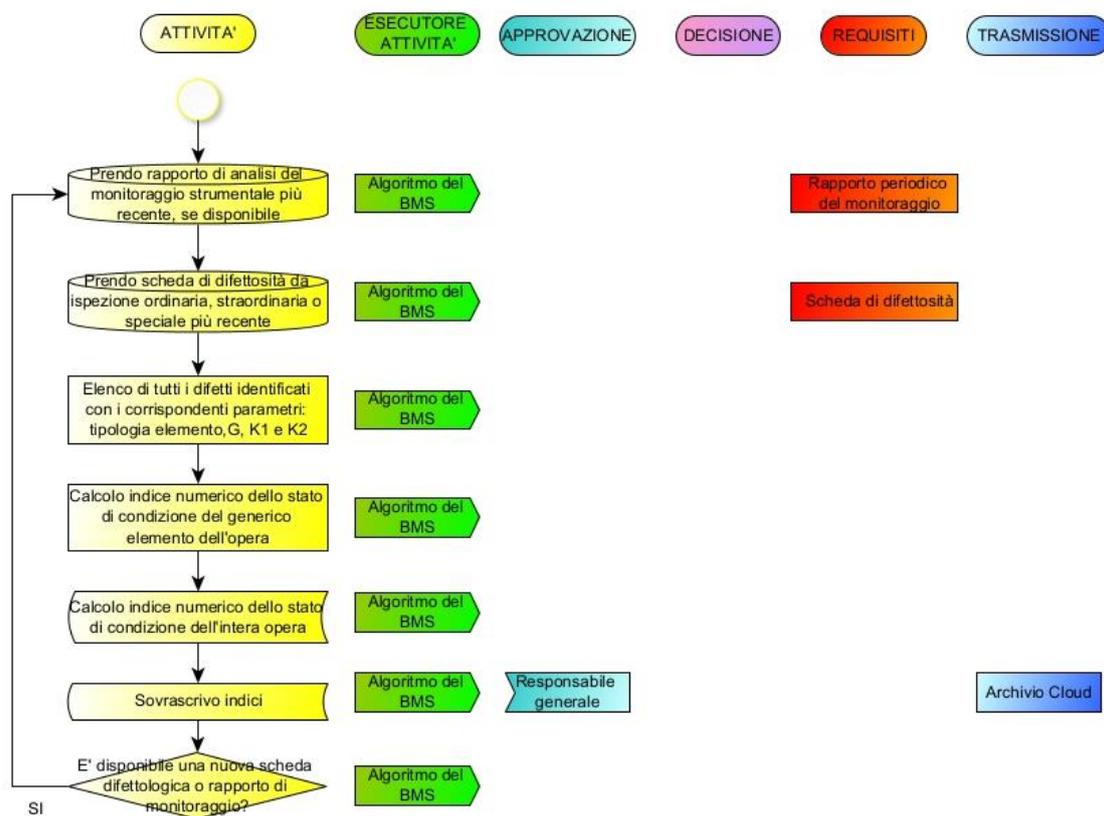


Fig. 5.22 – Processo “Aggiornamento dell'indicatore numerico dello stato di degrado”.



### 5.3.10 Processi di prognosi

La famiglia dei processi di prognosi si occupa di modellare degrado ed affidabilità della struttura nel tempo, utilizzati rispettivamente per definire delle soglie di allarme e programmare gli interventi manutentivi. Le Linee guida sui ponti accennano, in maniera non esaustiva, lo svolgimento di tali processi.

Il processo “modelli di degrado e soglie di allarme” consiste nella definizione delle leggi di variazione dell’indice dello stato di degrado della struttura e di soglie di allarme, superate le quali possono essere avviate ispezioni straordinarie o prove sperimentali sulla struttura. Il processo è mostrato in figura 5.23.



Fig. 5.23 – Processo “Modelli di degrado e soglie di allarme”.



In particolare, tale processo può avviare il processo “Programmazione ed avvio di ispezione straordinaria”. Il processo risulta sempre attivo e necessità del costante aggiornamento dell'indicatore numerico affinché possa avvenire l'aggiornamento del modello di degrado.

Il processo “Pianificazione di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria” viene utilizzato per la pianificazione degli interventi da eseguire su tutte le opere del gestore, sulla base del piano investimenti del gestore. Il processo è mostrato in figura 5.24.

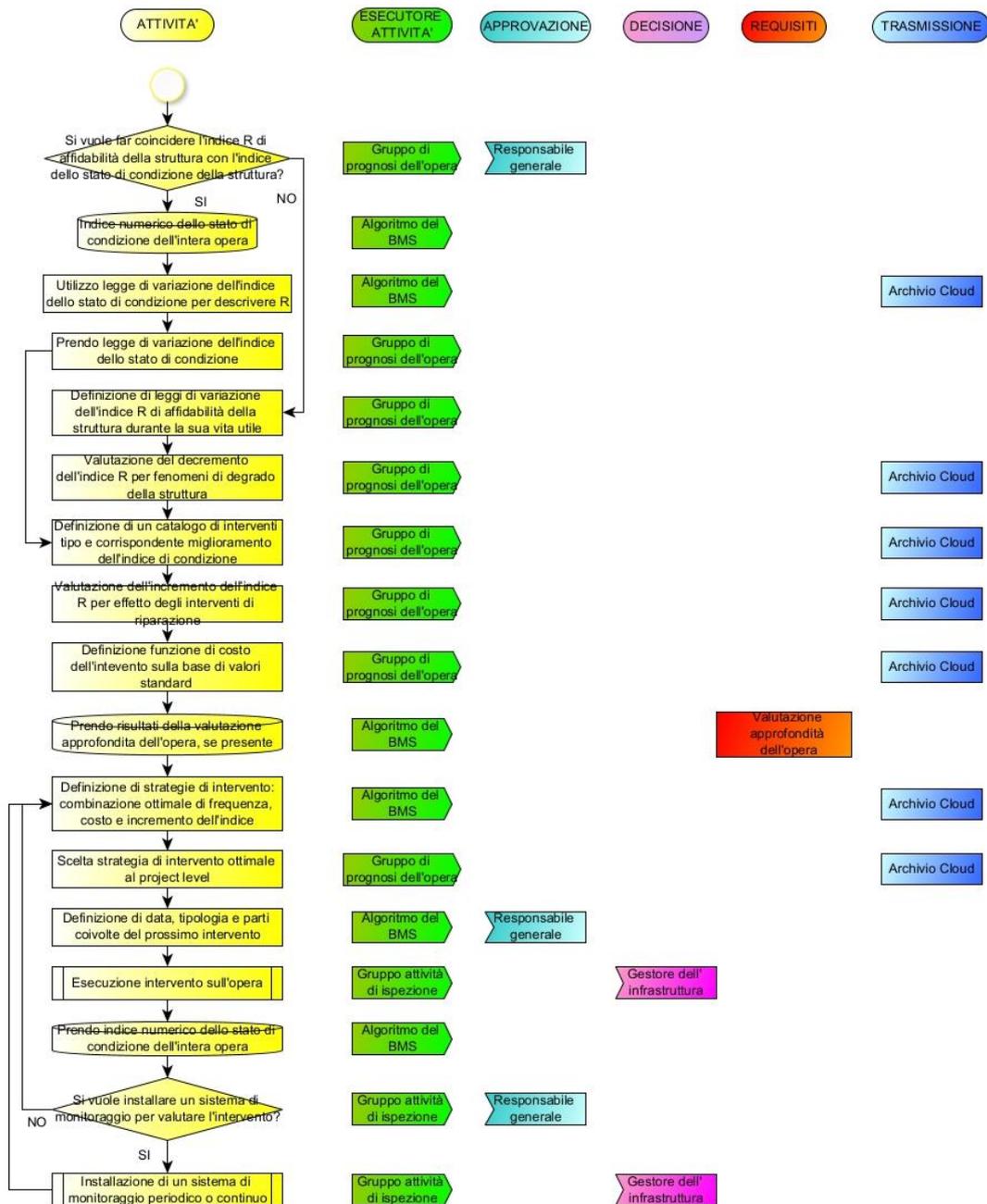


Fig. 5.24 – Processo “Pianificazione di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria”.



Il processo richiede informazioni provenienti dal processo “Aggiornamento dell'indicatore numerico dello stato di degrado” e dal processo “modelli di degrado e soglie di allarme”, qualora l'affidabilità della struttura venga descritta dalla legge di variazione dello stato di condizione.

## 5.4 Diagramma di flusso con Integrazione di strumenti di ispezione avanzati

L'insieme di processi definiti nel precedente paragrafo viene qui arricchito del gruppo di attività di rilievo e restituzione, che si inserisce in ambito di ispezione ordinaria. In particolare, si prevede la possibilità di integrare tecniche di rilievo e restituzione fotogrammetrica nel processo ispettivo. Gli enti coinvolti in ambito di gestione di ponti esistenti sono indicati in figura 5.25.

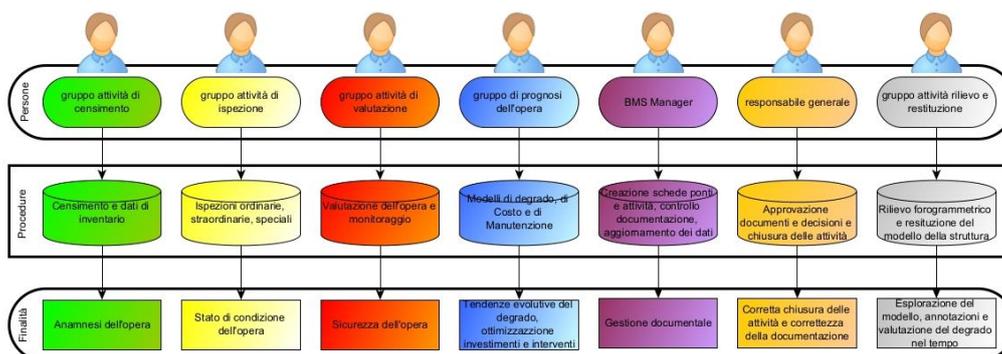


Fig. 5.25 - Principali enti coinvolti un sistema BMS coerente con le Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti.

La documentazione che deve essere prodotta dagli enti coinvolti nelle attività definite nel paragrafo 5.2.1, viene riproposta in figura 5.26.

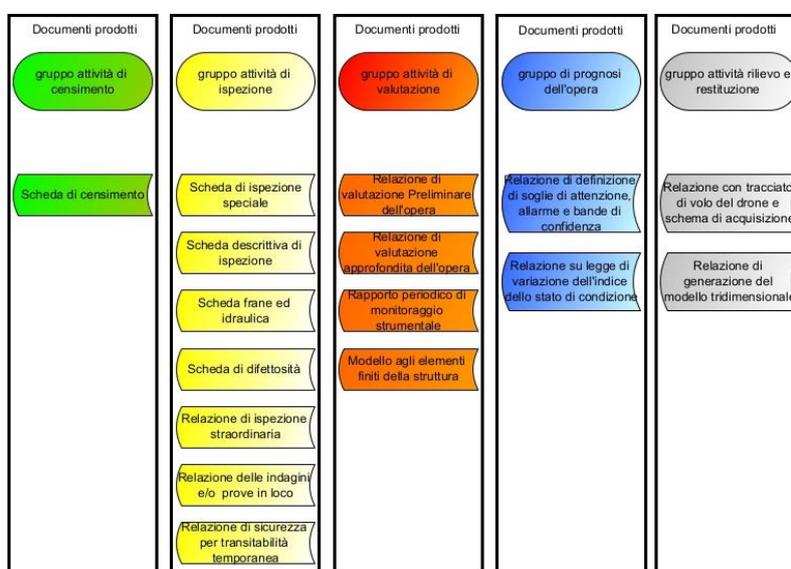


Fig. 5.26 – Documentazioni prodotte dagli enti coinvolti in un sistema BMS coerente con le Linee Guide sui ponti esistenti.



In tale capitolo viene ricreato il processo “Ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida”, con l’ipotesi che l’ispezione utilizzi strumenti ispettivi avanzati quali droni, software fotogrammetrici e reti neurali convolutive per l’identificazione del danno sulla struttura e compilazione delle schede difettologiche. Per motivi di impaginazione il processo è stato suddiviso in due sottoprocessi sequenziali, mostrati rispettivamente in figura 5.27 e 5.28.

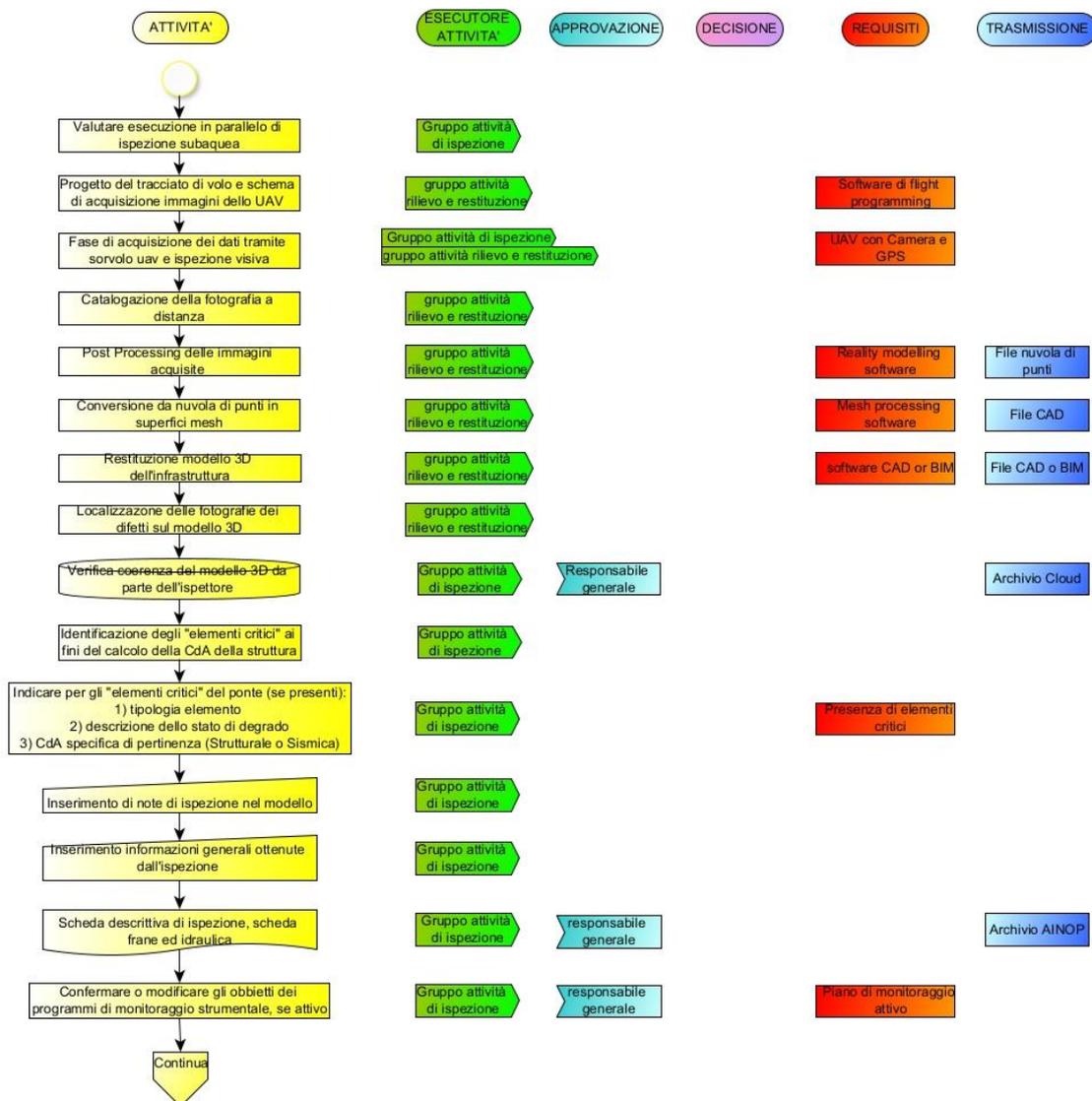


Fig. 5.27 – Prima parte del processo “Ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida”.

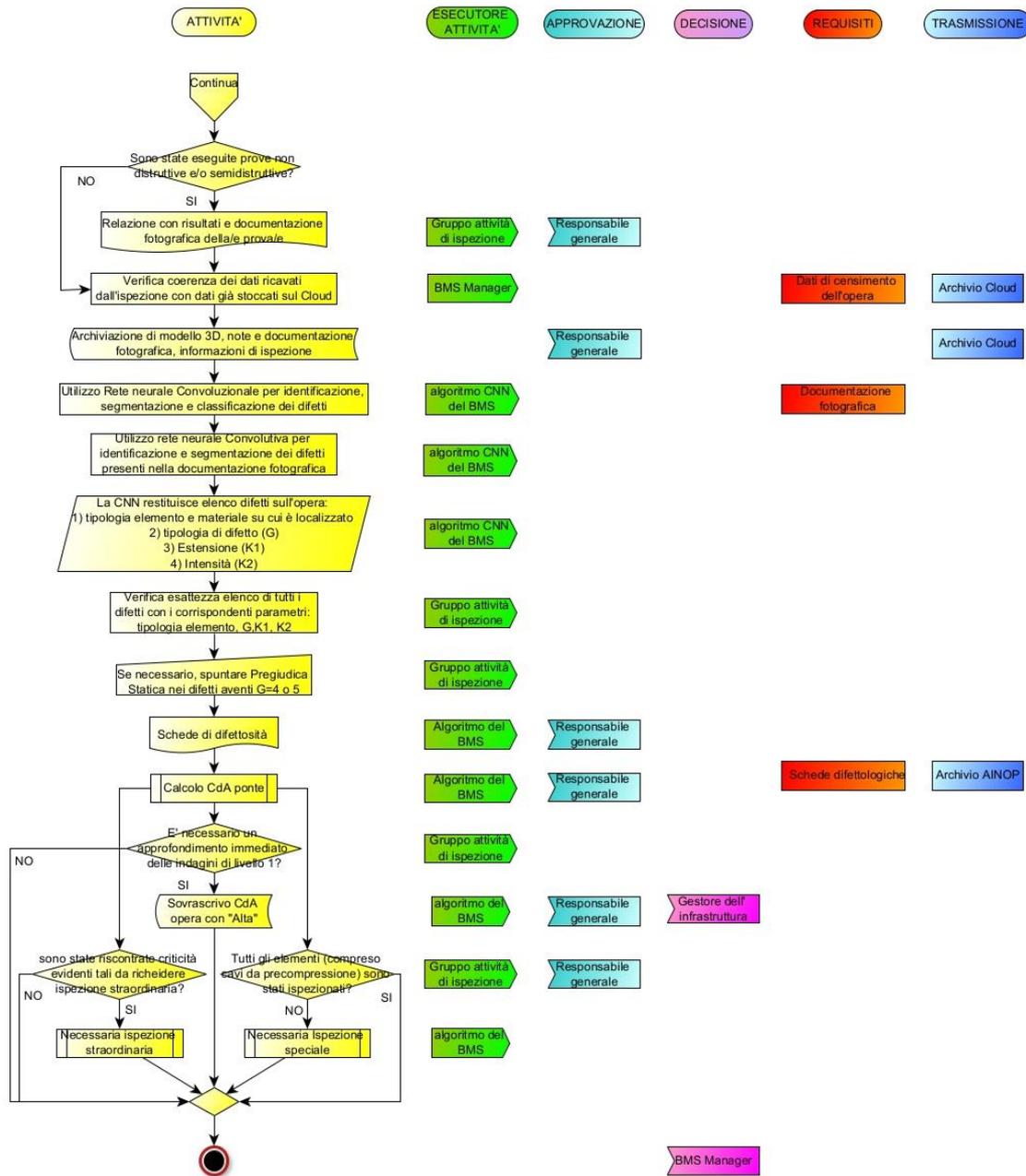


Fig. 5.28 – Seconda parte del processo “Ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida”.



### 5.4.1 Diagramma riassuntivo delle attività

In figura 5.29 viene proposta una schematizzazione semplificata della quasi totalità dei processi previsti dalle Linee Guida sui ponti esistenti, suddividendo le macro-attività in funzione della tipologia di appartenenza.

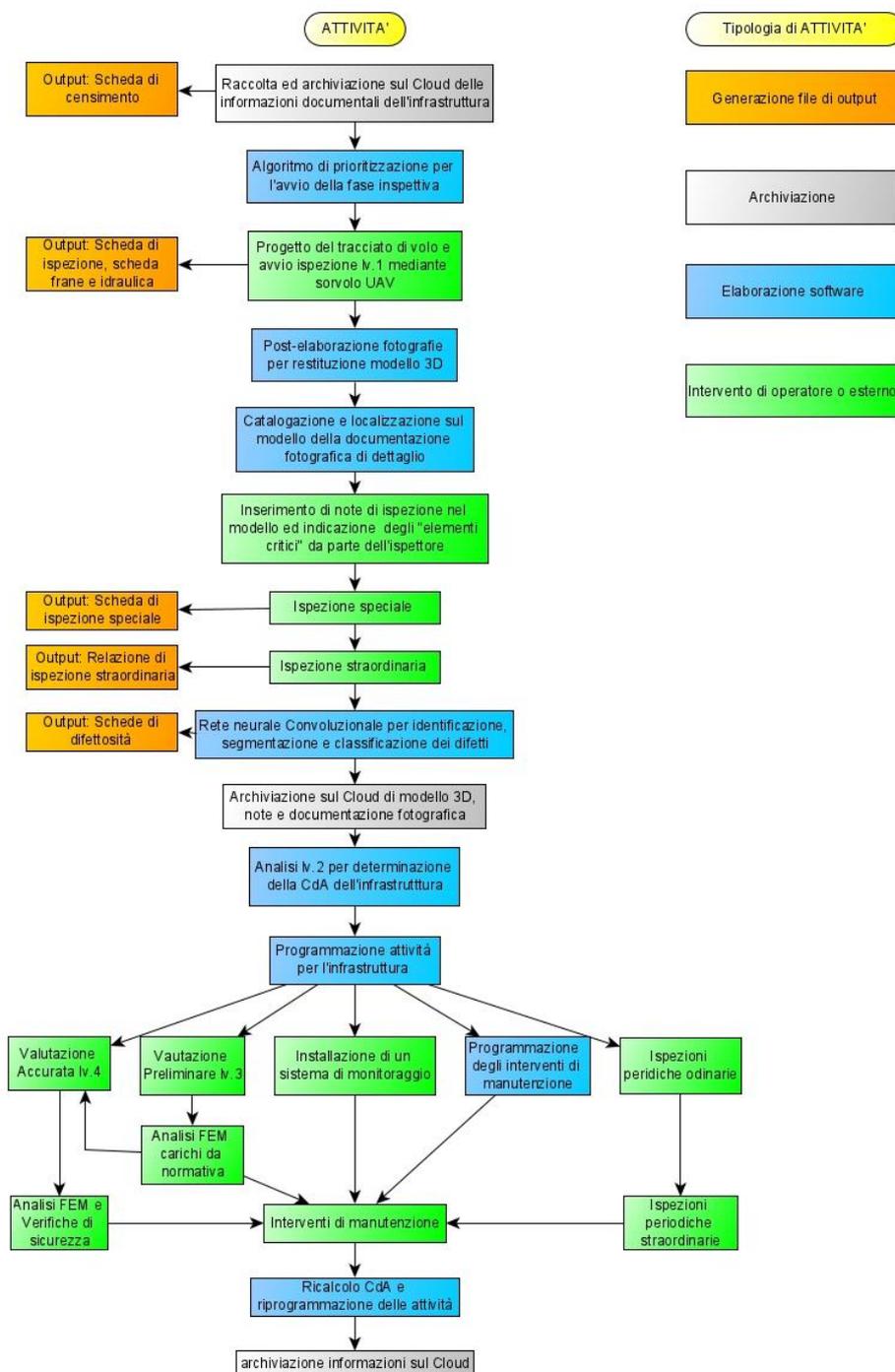


Figura 5.29 – Schematizzazione semplificata, non esaustiva, dei processi previsti dalle Linee Guida.





## Capitolo 6

# Implementazione UML delle Linee Guida

In tale capitolo verrà introdotto il linguaggio di modellizzazione unificato (UML) e le sue regole. Il linguaggio di modellizzazione unificato (UML) è un linguaggio formale che può essere utilizzato per descrivere un qualsiasi sistema<sup>1</sup>, basato sul concetto di oggetti. In tale capitolo il linguaggio UML verrà utilizzato per modellare i processi decisionali previsti dalle Linee Guida sui ponti esistenti.

Il motivo per cui è stato scelto tale linguaggio risiede nella capacità di esprimere in maniera esaustiva le entità che compongono un sistema complesso, le loro caratteristiche e le relazioni che le collegano<sup>2</sup>. Verranno realizzati diagrammi delle classi, diagrammi dei casi d'uso e diagrammi delle attività. Infine, sulla base dei diagrammi delle attività relative al calcolo della classe di attenzione, verrà realizzato un codice privo di interfaccia grafica e in linguaggio di programmazione Python capace di calcolare la CdA stessa.

### 6.1 Basi del linguaggio

Il linguaggio UML che verrà utilizzato in tale capitolo è un linguaggio semi formale, cioè non abbastanza preciso per diventare con appositi software un eseguibile. Una classe è un'entità astratta che si traduce a livello concreto in una serie di oggetti, detti anche istanze, per i quali ne riassume le caratteristiche. La modellazione di processo e la modellazione concettuale si avvalgono rispettivamente di strumenti come il diagramma di attività e il diagramma delle classi. Invece, i requisiti funzionali sono espressi da diagrammi dei casi d'uso.



### 6.1.1 Diagrammi di classe

L'elemento fondamentale di un diagramma delle classi è la classe stessa, rappresentata da un rettangolo avente diversi scompartimenti. Il primo scompartimento del rettangolo è il nome della classe, poi ho le proprietà, dette anche attributi, ed infine nell'ultimo spazio ho le operazioni<sup>5</sup>. Tutti gli oggetti che appartengono ad una medesima classe sono anche definiti dagli stessi attributi, cioè stesse tipologie di informazioni, i cui valori possono anche essere differenti tra loro. Gli elementi fondamentali ai fini della definizione di un diagramma di classe sono i seguenti:

- Associazione
- Molteplicità
- Associazione di aggregazione
- Relazione di generalizzazione, composizione e generalizzazione
- Associazione ricorsiva
- Classe di associazione
- Classe intermedia

Le associazioni permettono di legare assieme oggetti appartenenti a classi differenti. Ogni associazione può essere accompagnata da un nome significativo e una freccia che ne individua il verso di lettura. Non sempre si tratta di un collegamento logico di tipo biiettivo, così che ad un oggetto di una classe possono corrispondere anche più oggetti di una classe differente.

È possibile associare una molteplicità, o anche cardinalità, minima e massima, alle due estremità di ogni relazione. Essa definisce il numero di oggetti delle due differenti classi che sono coinvolti nella relazione.

Ogni associazione può essere provvista di una *classe di associazione*, la quale è spesso provvista di attributi, similmente ad una normale classe. Essa permette di rendere non ripetibile il legame tra due specifici oggetti delle due classi che collega.

Affinché una specifica coppia di oggetti provenienti da due classi diverse si possa ripetere, occorre inserire una classe intermedia tra le suddette classi, piuttosto che l'utilizzo della classe di associazione.

L'associazione di aggregazione è un caso particolare di associazione in cui l'oggetto rappresenta una parte dell'oggetto a cui è associato. Viene definita da una freccia con un rombo vuoto, che rappresenta molteplicità, nell'estremità diretta verso la classe madre.

L'associazione di composizione è un caso particolare di associazione in cui l'esistenza di un oggetto è legato all'esistenza dell'oggetto a cui è associato. Essa viene definita da una freccia con un rombo pieno, che rappresenta molteplicità 1, nell'estremità diretta verso la classe madre.

La relazione di generalizzazione, o specializzazione, è espressa mediante una freccia con estremità vuota, la quale sottintende una cardinalità di tipo 1 ad 1, rivolta nella direzione della classe più generale. Essa permette di legare due classi in modo tale che gli oggetti della prima ereditano tutti gli attributi della seconda, con la possibilità di averne degli altri esclusivi. L'operazione matematica corrispondente è quella del sottoinsieme.

L'associazione di dipendenza è espressa mediante una freccia tratteggiata con estremità aperta e rivolta nella direzione della classe indipendente. Oggetti della classe dipendente possono utilizzare oggetti della classe da cui dipende per eseguire un metodo e quindi, conseguentemente, se quest'ultimo oggetto viene modificato allora si modifica anche l'oggetto della classe dipendente.

L'oggetto di una classe può utilizzare gli oggetti della classe da cui dipende per eseguire un proprio metodo.

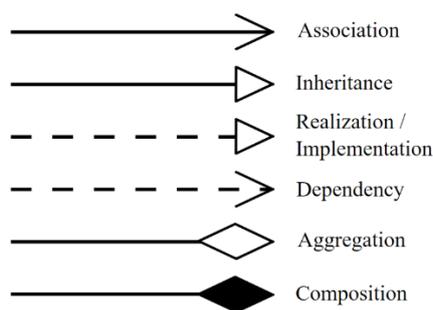


Fig. 6.1 - Tipi di associazioni ricorrenti in un diagramma di classe<sup>6</sup>.

Un'associazione ricorsiva permette di legare tra loro oggetti diversi appartenenti alla medesima classe. Le due estremità confluiscono nella medesima classe e possono presentare diverse cardinalità. Lo stato di visibilità degli attributi e delle operazioni è definito dai simboli "+", "-" e "#", che indicano rispettivamente una visibilità pubblica, privata o protetta. Il diagramma delle classi rappresenta i dati con cui il sistema informativo lavora e che deve gestire. Non va confuso con diagrammi dei casi d'uso, dove vengono definiti gli enti e le azioni di cui sono responsabili.



## 6.1.2 Diagrammi di attività

La modellazione di processo di un sistema informativo consiste nella definizione di vincoli logici e temporali delle azioni che possono essere effettuate dagli utenti. Un Diagrammi di attività definisce un processo sequenziale, composto da una serie di azioni e gli enti responsabili della loro esecuzione. Gli elementi fondamentali ai fini della definizione di un diagramma di attività sono i seguenti:

- Processo ed azioni
- Nodo iniziale, nodo terminale e nodo finale di flusso
- Azione
- *Token*
- Nodi *Fork* e *Join*
- Nodi *Decision* e *Merge*
- Attività complessa
- Invio e ricezione di un segnale

L'elemento fondamentale dei Diagrammi di attività è l'attività stessa, che rappresenta un insieme di azioni ed è anche detta processo.

L'azione è definita da un rettangolo arrotondato e deve avere un unico ingresso e uscita e può essere svolta dal sistema informativo senza intervento degli utenti oppure assieme ad essi. Tutte le azioni che sono effettuate dai soli utenti, in assenza del sistema informativo, non vengono modellate nel diagramma di attività. Il nodo iniziale rappresenta il punto iniziale di qualsiasi processo e determina la creazione di un segnalino, detto *token*. Quando un *token* raggiunge il nodo terminale, esso viene distrutto e l'intero processo viene terminato, anche se altri *token* non hanno raggiunto tale nodo. Il nodo finale di flusso è rappresentato da un cerchio con croce e causa la terminazione del solo *token* in esso confluyente. L'avvio di qualsiasi azione è subordinato all'arrivo del *token*, ed il suo completamento consente a quest'ultimo di superarla. Il significato del *token* deve essere definito per ogni diagramma di attività attraverso un'annotazione. In particolare, se il *token* è legato ad una certa classe del diagramma delle classi, esso si porta dietro anche tutte le informazioni che possono essere raggiunte attraverso i legami tra le classi.

Il nodo *Fork* è una sbarra nera che permette di duplicare il singolo token di ingresso in più Token in uscita, consentendo così lo svolgimento di azioni in parallelo. Nel caso in cui per procedere con l'azione risulti necessario raccogliere diversi token sparsi nel diagramma, si utilizza il nodo *Join*, reso necessario in seguito ad un nodo *Fork*. Si tratta di una sbarra che trattiene tutti i *token* in essa confluenti fino a quando arriva a contenere numero di *token* pari al numero di frecce in ingresso. A quel punto viene rilasciato un unico *token*.

Il costrutto di scelta, detto nodo *Decision*, è rappresentato da un rombo e consente al *token* di muoversi in un'unica freccia di uscita tra quelle disponibili,



ognuna delle quali è provvista di una condizione di controllo. Il token si muove solo nell'unica uscita in cui la condizione di controllo restituisce il valore booleano vero, sulla base di informazioni definite da precedenti azioni. L'informazione necessaria alla scelta può essere acquisita nell'azione precedente al nodo di decisione, ad esempio tramite un'azione che chiede all'utente di effettuare una scelta. In alternativa, la condizione di controllo può provenire dal modello concettuale, ovvero dal diagramma delle classi. Generalmente il valore di un attributo associato ad un oggetto, appartenente ad una classe nel diagramma delle classi, permette di definire il valore booleano di ognuna delle condizioni di controllo presenti.

Il nodo *Merge* è definito da un rombo e permette di far convergere più flussi alternativi in un unico percorso ed è necessario in seguito a costrutti di scelta.

Gli enti responsabili delle azioni possono essere indicati nella descrizione stessa delle azioni oppure possono essere indicati attraverso la notazione grafica "a corsie di nuoto", detta anche *swimlanes*. In quest'ultimo caso, tutte le azioni contenute all'interno di una specifica colonna sono associate ad un dato soggetto. In particolare, la colonna "sistema informativo" rappresenta le azioni che coinvolgono il solo sistema informativo. Qualsiasi azione che non coinvolge il sistema informativo non può essere modellata. Il passaggio della freccia da una colonna all'altra definisce uno scambio di informazioni tra enti.

Un'attività complessa rappresenta un insieme di attività ed è definita altrove in uno specifico diagramma di attività.

I costrutti del linguaggio permettono di modellare la comunicazione tra processi differenti del sistema informativo oppure con un SI esterno. Ciò avviene attraverso l'invio di segnali o di informazioni, ad esempio per stabilire che un processo può partire solo se è stata eseguita una determinata azione in un secondo processo.

Il segnale temporale è costituito da una clessidra che cattura il token e lo rilascia dopo un certo intervallo di tempo, preventivamente fissato.

Il costrutto di ricezione di segnale è definito da un rettangolo seghettato e permette di catturare il token in arrivo e rilasciarlo solo quando viene ricevuto un certo segnale, inviato dall'esterno. Se il segnale viene ricevuto prima dell'arrivo del token in ingresso, tale costrutto genera comunque un token e lo fa procedere in avanti. Il costrutto di invio del segnale è definito da un rettangolo con un lato appuntito e cattura e rilascia il token immediatamente dopo che il segnale viene inviato, indipendentemente dalla sua ricezione. Ricezione e invio devono essere necessariamente accoppiati tra loro e devono riportare la stessa descrizione. Non occorre definire a chi è rivolto o da chi deve essere inviato un dato segnale. Il Nodo oggetto è indicato da un rettangolo e va a ripescare un oggetto contenuto nel diagramma di classe.

I costrutti di scelta deterministica e non deterministica sono spesso utilizzati in tali diagrammi. Il Costrutto di scelta deterministica consente di avviare due azioni in parallelo e di scegliere di completare anche solo una delle due andando così

a terminare il processo. È composto da un nodo Fork, blocchi di azione in parallelo e infine un nodo Merge che li unisce. Tale costrutto viene spesso usato in azioni complesse. Il costrutto di scelta non deterministica consente è molto simile al precedente con la differenza che al posto del nodo merge, ogni azione in parallelo ha il suo nodo finale. Quando si verifica una delle azioni in parallelo, il processo termina, lasciando le altre incomplete. Questi ultimi due costrutti sono schematizzati in figura 6.1.

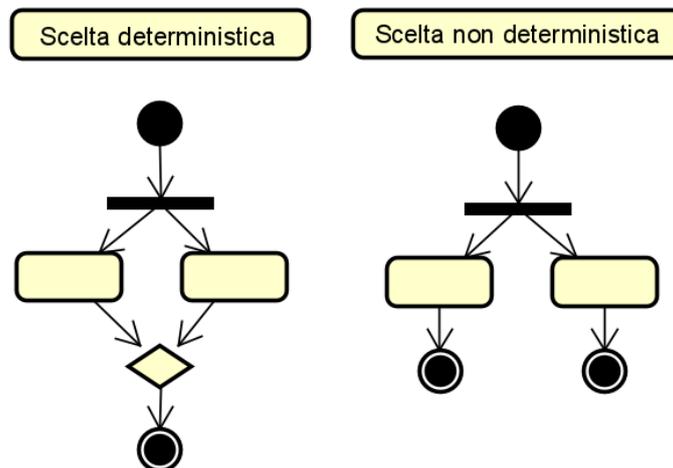


Fig. 6.1 – Costrutti di scelta deterministica e non deterministica.

### 6.1.3 Diagrammi dei casi d'uso

Il diagramma dei casi d'uso permette di riassumere i dettagli relativi agli enti coinvolti nel sistema informativo, definiti attori, e le loro interazioni con esso. Non viene definito un ordine con cui vengono eseguite le attività ma solamente le relazioni tra casi d'uso, attori e sistema informativo.

Ogni attore è rappresentato da una sagoma posta esternamente al riquadro che rappresenta il sistema informativo. Gli attori principali e secondari sono posti rispettivamente sulla sinistra e destra. I tipi di legami sono associazioni, inclusione, estensione e generalizzazione. Il primo tipo è modellato da linee che collegano attori e caso d'uso in cui sono coinvolti. Le inclusioni sono modellate da frecce tratteggiate rivolte nella direzione del caso d'uso incluso in quello principale e dalla scritta `<<include>>`. Ogni volta che il caso d'uso viene eseguito, deve anche essere eseguito il caso d'uso in esso incluso. La relazione di estensione è modellata da una freccia tratteggiata rivolta nella direzione del caso d'uso principale e dalla scritta `<<extend>>`. Essa riguarda i casi d'uso che non vengono eseguiti ogni qual volta viene eseguito il caso d'uso principale.

In alcuni casi è possibile aggiungere un dettaglio dei "punti di estensione" all'interno del caso d'uso principale, che hanno la finalità di definire meglio le sue estensioni. Il legame di generalizzazione è definito da una freccia continua con





Mediante le varie tipologie di associazione, ogni oggetto viene associato ad uno o più oggetti di ognuna delle classi contigue. In questo modo, se si associa un oggetto ad un token del diagramma di attività, quest'ultimo avrà accesso anche a tutte le classi a cui tale oggetto è legato nel diagramma concettuale.

### 6.3 Diagrammi di attività delle Linee Guida

Viene di seguito definito un diagramma di classe che modella i passaggi per il calcolo della classe di attenzione complessiva di un'opera secondo le Linee Guida. Il Diagramma di attività principale contiene cinque azioni complesse, a loro volta definite in altrettanti diagrammi di attività. Lo schema generale di tali diagrammi è definito in figura 6.3.

Name	Kind	Parent
Activity Diagram: Calcolo della CdA Rischio frane		Calcolo della CdA Complessiva
Activity Diagram: Calcolo della CdA Rischio idraulico		Calcolo della CdA Complessiva
Activity Diagram: Calcolo della CdA Sismica		Calcolo della CdA Complessiva
Activity Diagram: Calcolo della CdA Strutturale e fondazionale		Calcolo della CdA Complessiva
Activity Diagram: Calcolo della CdA complessiva dell'opera		Calcolo della CdA Complessiva
Activity Diagram: CdA arbitraria assegnata		Calcolo della CdA Complessiva

Figura 6.3 – Diagrammi di classe che modellano il calcolo della classe di attenzione complessiva di un'opera.

Il diagramma di classe principale viene indicato di seguito in figura 6.4.

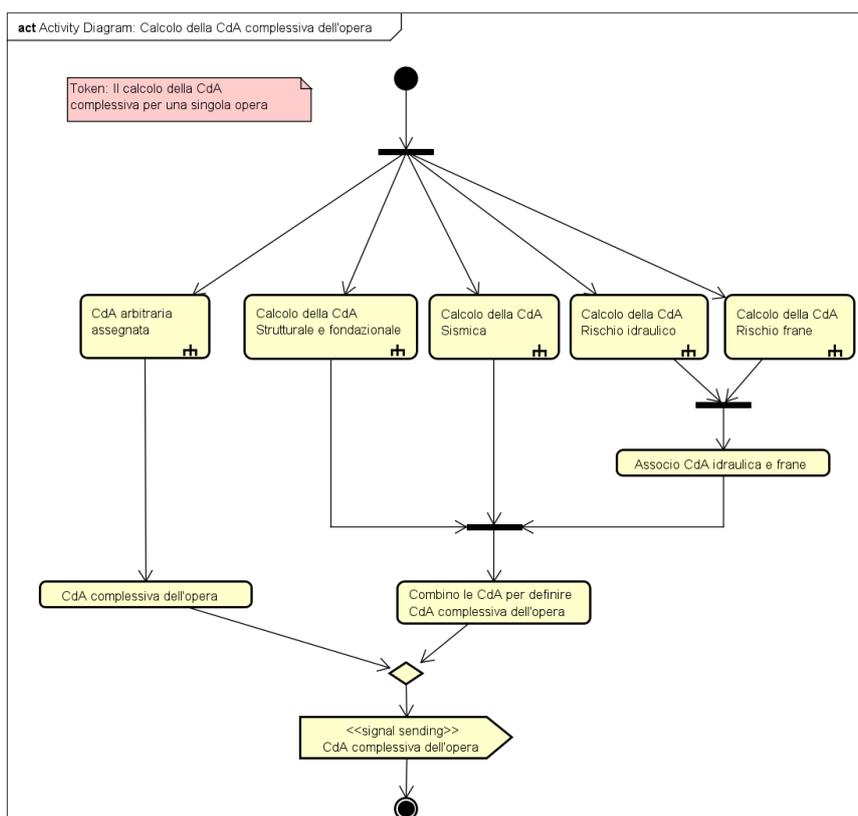


Figura 6.4 - Diagramma di Attività "Calcolo della CdA complessiva dell'opera".



Affinché il token possa superare un'attività complessa, è necessario che essa stessa venga avviata e completata. Di seguito, nelle figure da 6.5 a 6.8, vengono modellati i diagrammi di attività che nel diagramma di classe principale erano stati modellati come attività complesse.

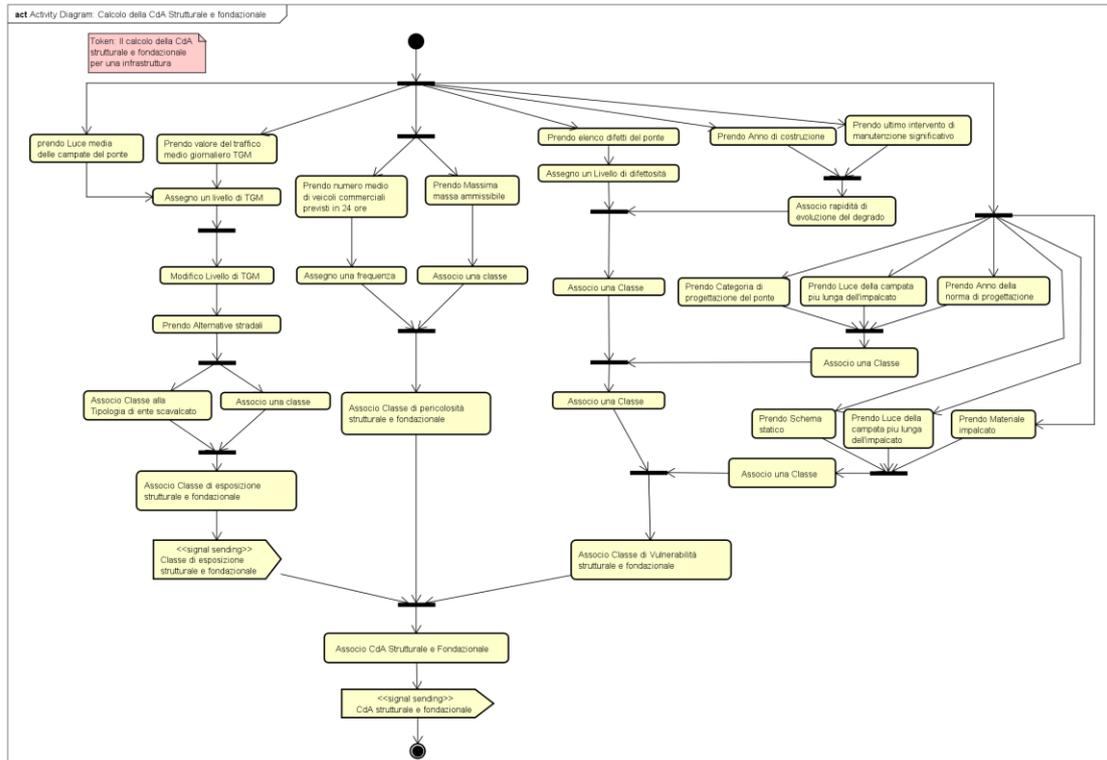


Figura 6.5 – Diagramma di Attività “Calcolo della CdA Strutturale e fondazionale”.

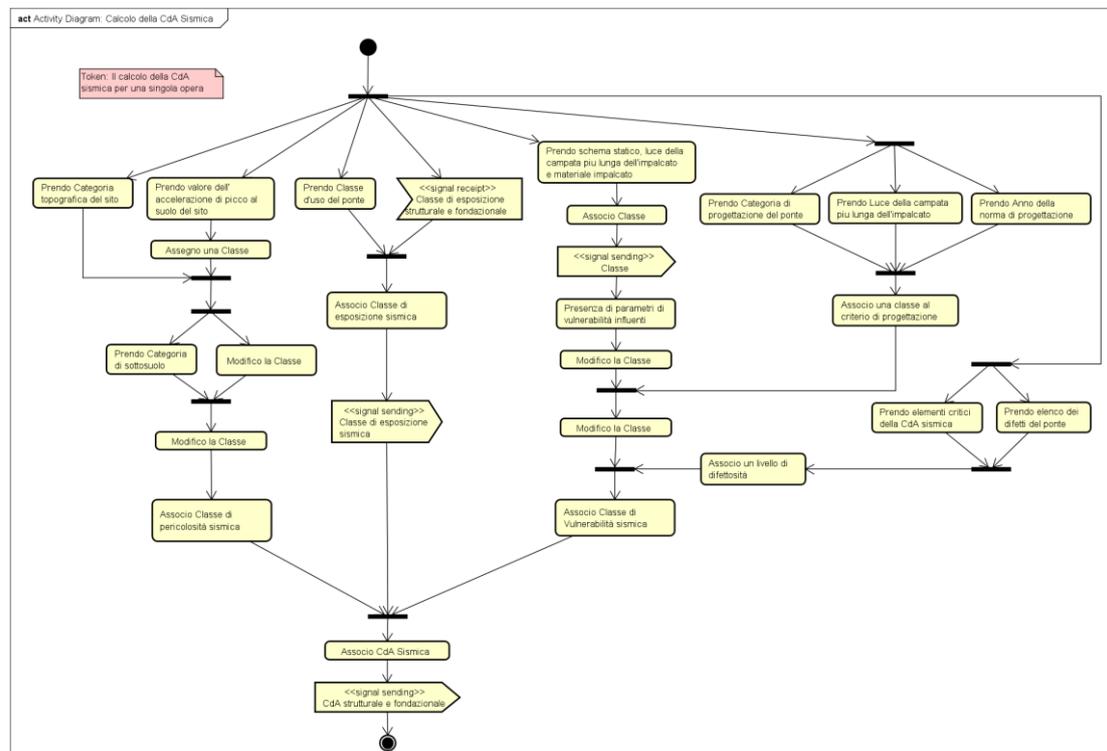


Figura 6.6 – Diagramma di Attività “Calcolo della CdA Sismica”.

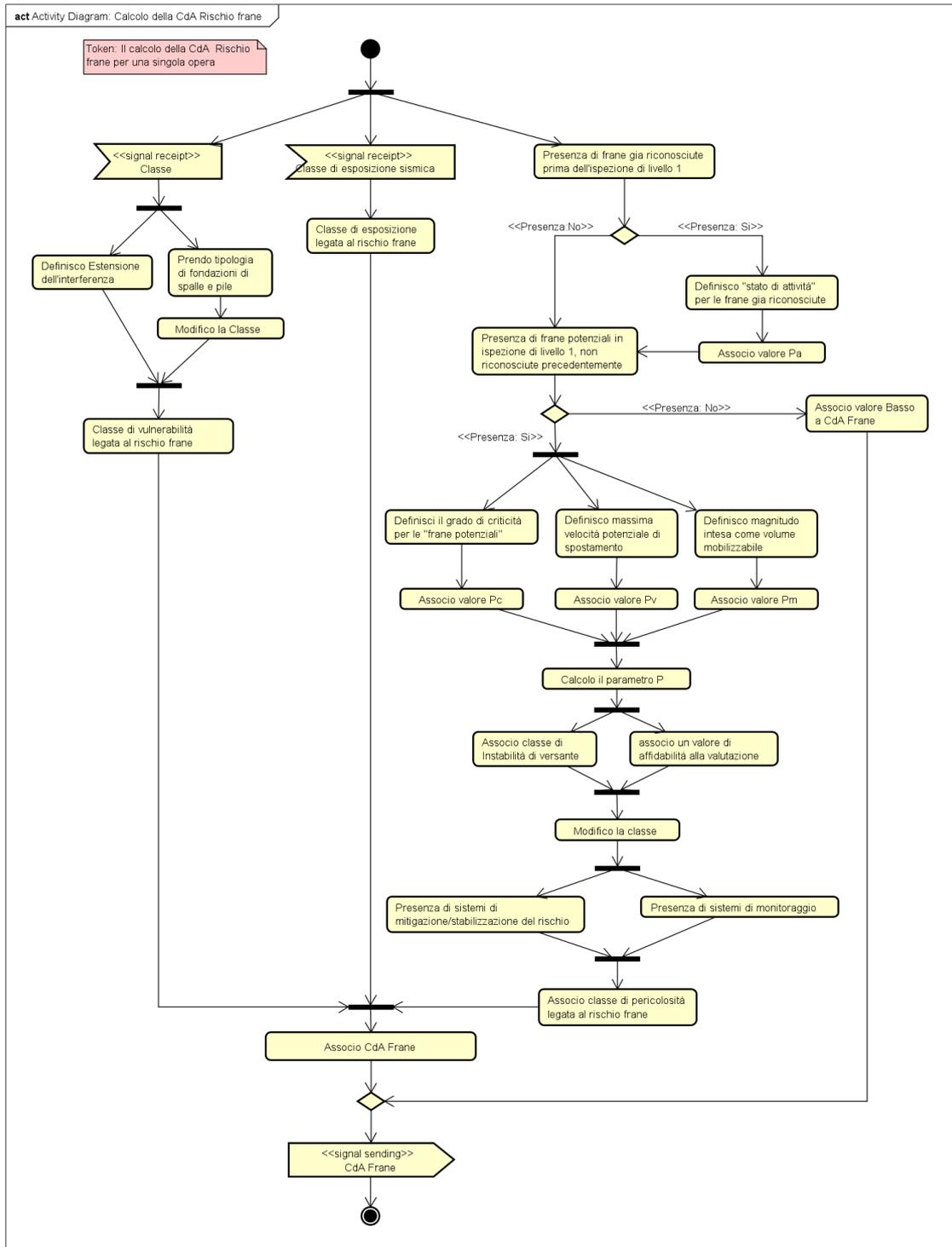


Figura 6.7 – Diagramma di Attività “Calcolo della CdA Rischio frane”.

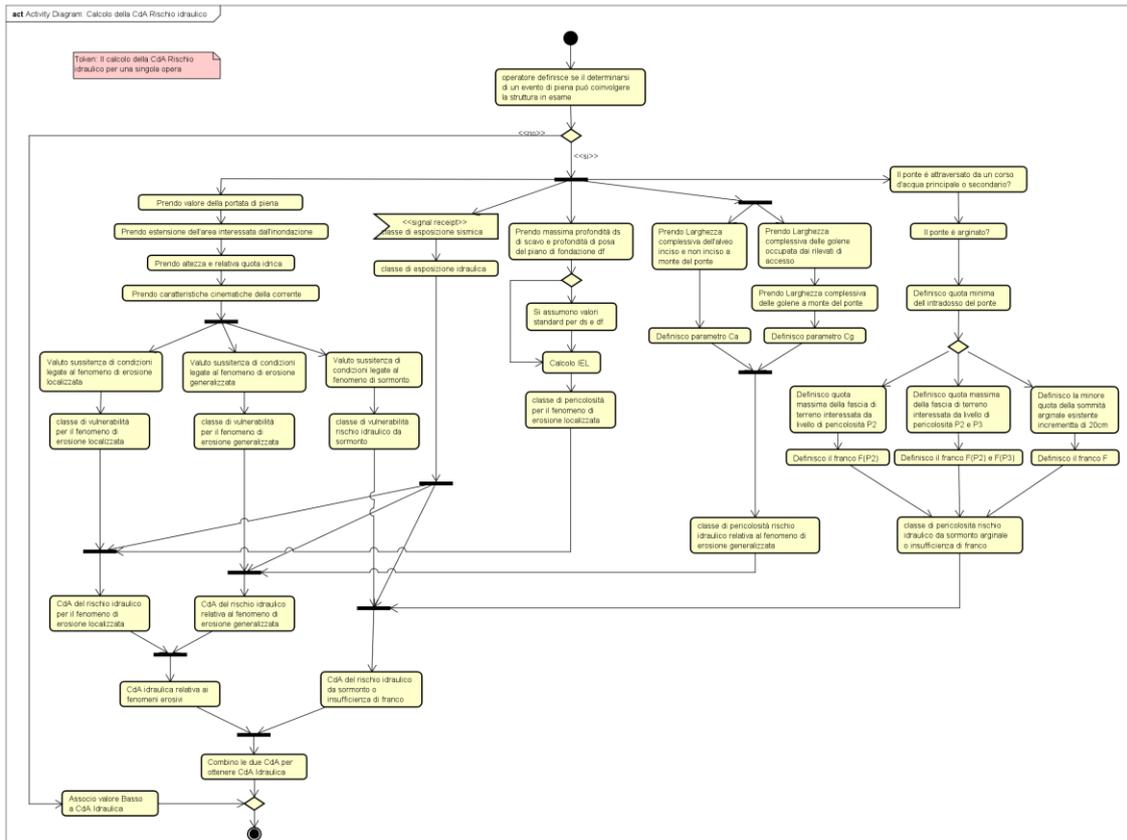


Figura 6.8 – Diagramma di Attività “Calcolo della CdA Rischio Idraulico”.

I vari nodi di Invio e ricezione di segnale permettono ai cinque diagrammi di attività secondari di comunicare e scambiare informazioni tra loro. In particolare, il calcolo di alcune classi di attenzione richiede di aver già calcolato altre diverse classi di attenzione. In figura 6.9 è definito nel dettaglio l'attività complessa indicata come “CdA arbitraria assegnata”.

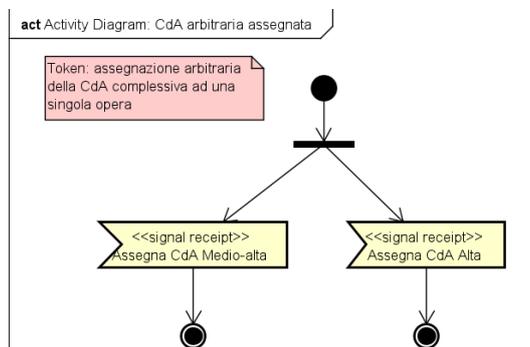


Figura 6.9 - Diagramma di Attività “CdA arbitraria assegnata”.

Tale azione complessa rappresenta un processo di scelta non deterministica, cioè un diagramma di attività che si chiude immediatamente al verificarsi di una qualsiasi delle due condizioni in essa modellate. Di seguito viene proposta la modellazione di un di un processo di ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida, secondo la metodologia definita a corsie di nuoto. La posizione della



generica attività all'interno del diagramma ne definisce con esattezza l'ente in essa coinvolto. Il processo di ispezione ordinaria è mostrato in figura 6.10.

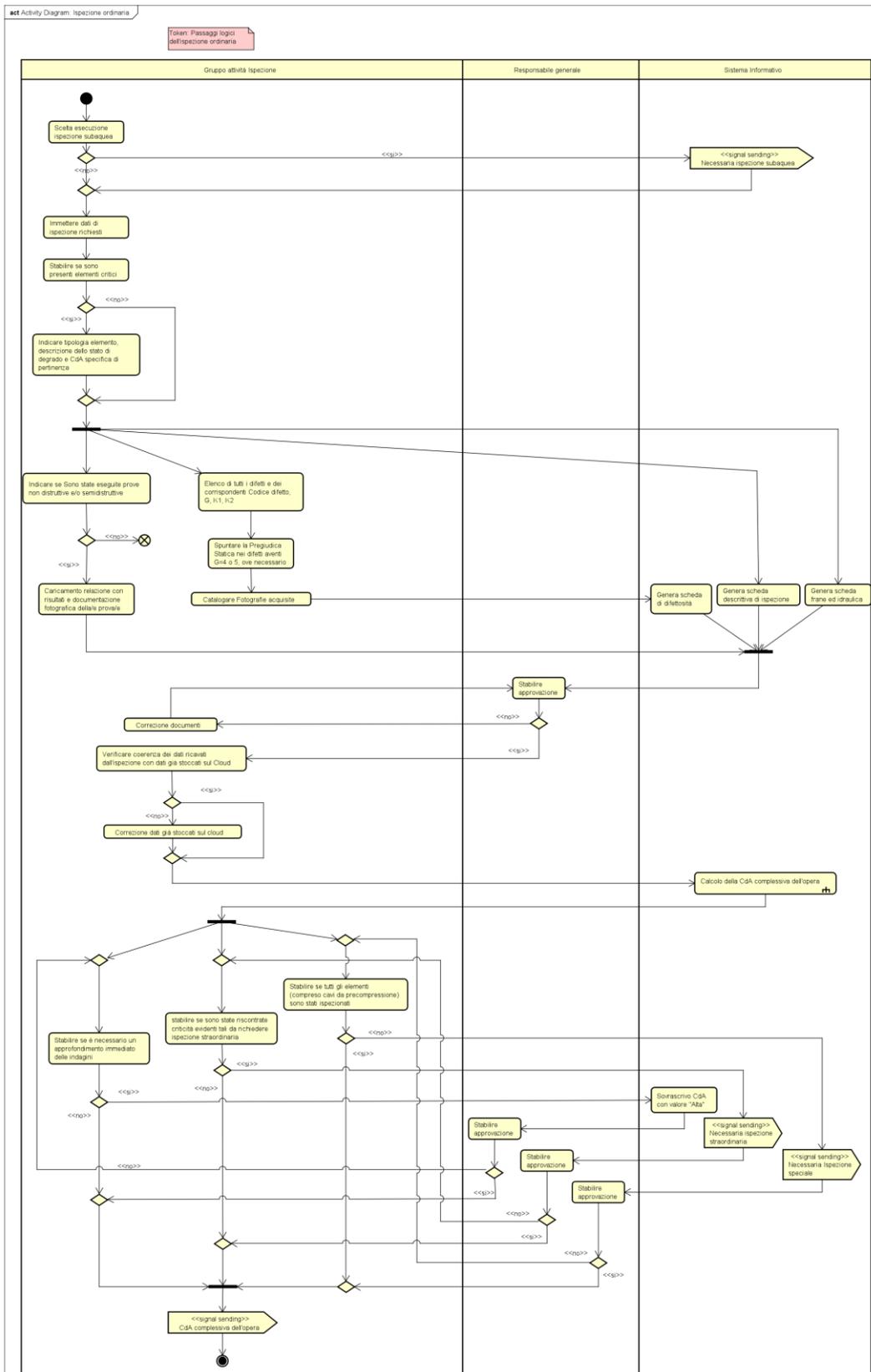


Fig 6.10 – Diagramma di attività di tipo “Swimlanes” di un processo di ispezione ordinaria in accordo con le Linee Guida.

## 6.4 Diagrammi dei casi d'uso delle Linee Guida

Di seguito viene proposta la modellazione di un Diagramma dei casi d'uso, da inserirsi all'interno di un sistema di gestione di ponti. La modellazione presente in figura 6.11 è di carattere generale e non esaustivo, ha la finalità di definire gli enti coinvolti nelle varie attività previste nel sistema di gestione e di valutarne una loro eventuale interazione.

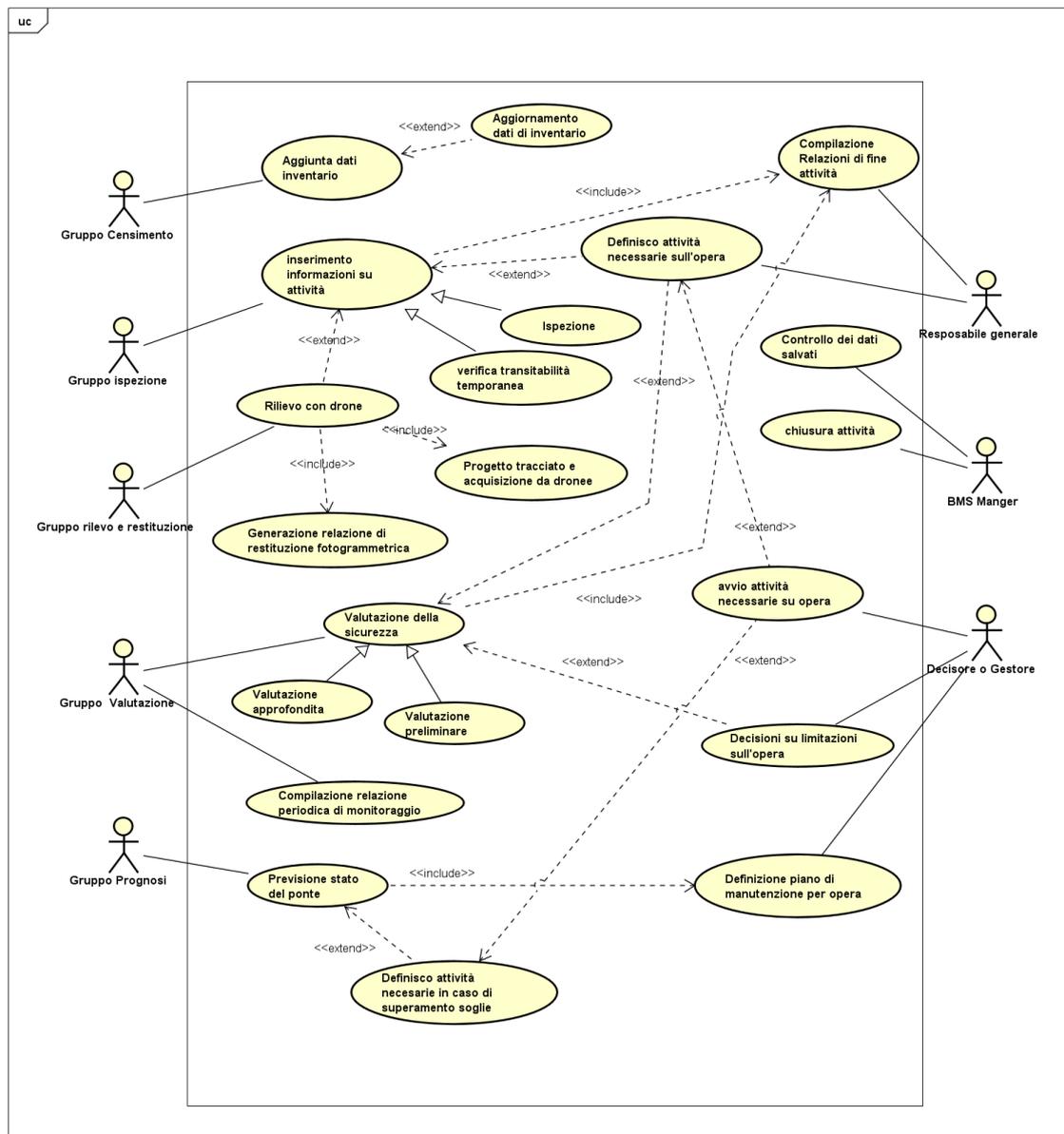


Fig. 6.11 – Diagramma dei casi d'uso degli enti coinvolti nelle attività di anamnesi, prognosi, ispezione, valutazione e decisione all'interno di un sistema di gestione di ponti.



## 6.5 implementazione software del calcolo della Classe di Attenzione

La realizzazione dei diagrammi di attività relativi al calcolo della classe di attenzione complessiva della generica opera ha permesso la scrittura di un codice in linguaggio di programmazione Python capace di calcolare la CdA stessa. Il suddetto codice, privo di interfaccia grafica, chiede a schermo l'inserimento da parte dell'utente di un certo numero di input, necessari al calcolo dell'indice finale. Sono richiesti a schermo, e in maniera sequenziale, gli input richiesti per il calcolo delle quattro classi di attenzione intermedie, che vengono poi combinate assieme per fornire il valore della CdA complessiva. Il software prevede la possibilità di inserire sia valori numerici che stringhe di testo e restituisce a schermo i seguenti output:

1. Livello di difettosità attuale di tipo strutturale e fondazionale
2. CdA di vulnerabilità strutturale e fondazionale
3. CdA di pericolosità strutturale e fondazionale
4. CdA esposizione strutturale e fondazionale
5. CdA strutturale e fondazionale
6. Livello di difettosità attuale di tipo Sismico
7. CdA di vulnerabilità sismica
8. CdA di pericolosità sismica
9. CdA esposizione sismica
10. CdA Sismica
11. Classe di vulnerabilità legata al rischio frane
12. Classe di esposizione legata al rischio frane
13. classe di pericolosità legata al rischio frane
14. CdA rischio Frane
15. CdA del rischio idraulico per il fenomeno di erosione localizzata
16. CdA del rischio idraulico relativa al fenomeno di erosione generalizzata
17. CdA idraulica relativa ai fenomeni erosivi
18. CdA del rischio idraulico da sormonto o insufficienza di franco
19. CdA idraulica
20. CdA Complessiva dell'opera



Di seguito viene mostrata la Shell del programma Python in cui viene fatto eseguire il codice di calcolo della Classe di Attenzione complessiva dell'opera. In figura 6.12 viene mostrato a titolo di esempio i primi valori numerici ed elementi stringa di cui è richiesto l'inserimento.

```
Python 3.9.0 Shell
File Edit Shell Debug Options Window Help
*Python 3.9.0 Shell*
numero di transitabilità [veicoli/giorno]: 30000
luce media della campata del ponte [numero intero in metri]: 30
sono presenti alternative stradali adeguate? [Scegliere tra: si/no]si
Tipologia di ente scavalcato [Scegliere tra: alta/media/bassa]media
la CdA esposizione strutturale e fondazionale è 4.0
PS: i valori numerici da 1 a 5 corrispondono rispettivamente alle classi da BASSO ad ALTO.
Numero medio di veicoli commerciali previsti in una singola corsia di marcia in 24 ore [veicoli/giorno]: 4000
Massima massa ammissibile all'istante di tale valutazione[Scegliere tra: ntc/44t/26t/8t/3.5t]: ntc
7
la CdA di pericolosità strutturale e fondazionale è 5
PS: i valori numerici da 1 a 5 corrispondono rispettivamente alle classi da BASSO ad ALTO.
è presente almeno una condizione critica sul ponte?[si/no](Es. quadri fessurativi molto estesi,cinematismi, perdita di appoggio): no
quanti difetti vuoi inserire?[Inserire numero intero](PS: inserire 0 se non ci sono difetti): 1
Occorre inserire 5 parametri per ogni difetto riscontrato sul ponte
Esempi di elementi critici dal punto di vista strutturale e fondazionale:
Selle gerber, cavi da precompressione, quadri fessurativi estesi,meccanismi incipienti di perdita di appoggio o cinematismi in atto,
giunzioni di elementi chiave per la statica del ponte, scalzamento delle fondazioni
I parametri sono elemento critico?[si/no] G[1-5] K1[0.2-1] K2[0.2-1] PS[si/no].
Tra un valore e il successivo occorre inserire una singola spaziatura.Usare lettere minuscole. Esempio: no 4 1 0.3 si
Inserire i 5 valori spaziat del difetto numero 1: no 4 1 1 si
Di seguito i 5 vettori contenenti i valori inseriti:
['no']: Vettore elemento critico ai fini della cda strutt-fondazionale
['4']: Vettore gravità dei difetti
['1']: Vettore estensione dei difetti
['1']: Vettore intensità dei difetti
['si']: Vettore pregiudica statica PS dei difetti
il livello di difettosità attuale del ponte è 4
PS: i valori numerici da 1 a 5 corrispondono rispettivamente alle classi da BASSO ad ALTO.
Anno di costruzione del ponte [anno]: 1960
Anno dell'ultimo intervento di manutenzione significativo del ponte [Es. 1940, oppure "0" se assente]: 2000
i prossimi tre input richiesti non sono utili ai fini del calcolo. posso mettere qualsiasi valore
Categoria di progettazione del ponte?(se incognita, inserire valore numerico "2") [1/2]: 2
Anno della norma di progettazione [anno]: 1900
Luce della campata piu lunga dell'impalcato[numero intero in metri]: 60
```

Fig. 6.12 – Schermata della Shell di Python che mostra i primi parametri che il programma chiede di inserire a schermo.



## Sitografia del capitolo

1. [https://it.wikipedia.org/wiki/Unified\\_Modeling\\_Language](https://it.wikipedia.org/wiki/Unified_Modeling_Language)
2. <http://www.cs.unibo.it/gabbri/MaterialeCorsi/1.introUML.favini.pdf>
3. <https://astah.net/>
4. [https://www.lucidchart.com/pages/it/diagramma-di-flusso/#section\\_3](https://www.lucidchart.com/pages/it/diagramma-di-flusso/#section_3)
5. <https://www.youtube.com/watch?v=fTbi0DQPtVc>
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Class\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Class_diagram)



# Capitolo 7

## Conclusioni e Lavori Futuri

Quest'ultimo capitolo riassume le conclusioni e le raccomandazioni per lavori futuri che possono basarsi su questo lavoro di tesi.

### 7.1 Conclusioni

Una corretta pianificazione delle attività di controllo, valutazione e manutenzione sulle opere è fondamentale per garantirne la piena funzionalità e sicurezza.

L'avvento dei *Bridge Management System* in Italia e la pubblicazione delle *Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti* hanno consentito di sopperire alle problematiche legate alla gestione dei ponti in Italia e nel mondo. Nel presente lavoro di tesi si è dunque eseguito un esame dei nodi decisionali previsti dalle Linee Guida per i ponti esistenti, al fine di ricavarne una suddivisione in differenti processi.

Si utilizza il linguaggio di modellizzazione unificato per modellare alcuni processi decisionali previsti dalle suddette Linee Guida in modo tale da consentirne, in un secondo momento, l'implementazione in un sistema di gestione dei ponti.

Viene poi analizzata la fase di ispezione visiva delle opere e valutati i vantaggi dell'integrazione di droni, visti come supporto ai processi di gestione e manutenzione dei ponti esistenti. A tal fine, viene indagata la possibilità di ottenere modelli tridimensionali in scala delle strutture ispezionate mediante rilievo fotogrammetrico eseguito da drone.

I principali metodi di calcolo esistenti per la quantificazione del danno strutturale nei ponti vengono messi a confronto per evidenziarne i vantaggi e svantaggi. Un'importante porzione del lavoro viene dedicata allo sviluppo di un applicativo software in grado, grazie al riconoscimento automatico del danno, di identificare fessure all'interno di fotografie scattate su strutture in calcestruzzo armato. Il metodo di rilevamento delle fessure proposto è costituito da due elementi



fondamentali: classificazione e segmentazione delle immagini. Attraverso sviluppi futuri dell'applicativo, sarebbe possibile quantificare il danneggiamento in termini di dimensione ed estensione, al fine di eseguire autonomamente ciò che tradizionalmente viene effettuato visivamente da operatori del settore.

Le tecniche di rilievo finora introdotte, quali il rilievo tramite drone e il rilevamento del danno strutturale tramite rete neurale convolutiva, vengono anch'esse integrate nella schematizzazione dei processi.

## **7.2 Lavori futuri**

La ricerca presentata in questo lavoro di tesi ha molti punti che possono essere ulteriormente approfonditi. In questo paragrafo verranno evidenziati quelli più importanti. Riguardo i metodi di valutazione del danno sui ponti utilizzati nel mondo, i vari indici dello stato di condizione della struttura e/o dei suoi elementi:

- Possono essere confrontati dal punto di vista pratico della compilazione di una scheda difettologica ed integrati in un software BMS.
- Possono essere implementati in modelli prognostici di previsione del degrado e di pianificazione degli interventi.

Riguardo la restituzione di modelli tridimensionale delle strutture a partire da ispezioni con droni:

- È possibile trattare la nuvola di punti ricavata dal software restituzione fotogrammetrica in un programma di vettorizzazione delle superfici, al fine di ricavare un modello regolare e continuo. Tale modello può essere successivamente implementato in un software di tipo BIM oppure in software BMS per la gestione dei ponti esistenti, al fine ad esempio di quantificare e misurare i difetti presenti.

Per quanto riguarda l'identificazione e la segmentazione delle fessure, la rete neurale convolutiva può essere migliorata attraverso:

- L'utilizzo di un dataset di immagini con maggiore varietà di fessure e su materiali differenti.
- La ripetizione della fase di addestramento con macchine dotate di maggiore memoria e potenza computazionale.
- L'introduzione di nuove classi di danneggiamento, come ad esempio macchie di umidità e barre di rinforzo scoperte.
- L'implementazione su drone per esecuzione dell'algoritmo in tempo reale.



Per quanto riguarda l'analisi funzionale delle linee guida sui ponti e i diagrammi UML, è possibile implementare le Linee guida all'interno di un sistema software di gestione dei documenti, meglio conosciuti come *Document Management System Software*. All'interno di tale semilavorato, utilizzando opportuni strumenti software, è possibile integrare tutti i processi e le attività modellate in tale lavoro di tesi.



## Bibliografia

- [1] Paola Sapienza, Un sistema di supporto alle decisioni per la gestione della manutenzione dei ponti di una rete viaria, Università degli studi di Catania, 2012
- [2] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto ministeriale n. 27 del 15 gennaio 2020
- [3] Fregolent Silvia, Interrogazione a risposta immediata in commissione Atto n. 5/03734 del 03/03/2020, Gruppo Italia Viva
- [4] Ministero dell'Interno, Circolare Ministero dei Lavori Pubblici n. 6736/61A1 del 19 Luglio 1967
- [5] Ministro dei Lavori Pubblici, Circolare Ministero dei Lavori Pubblici n. 34233 del 25 Febbraio 1991
- [6] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto Legislativo N. 285 del 30/04/1992
- [7] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 e Circolare n. 617/C.S.LL.PP del 2 Febbraio 2009
- [8] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti del 2020, allegate al parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n.88/2019
- [9] Riccardo Pefano, Gestione dei ponti esistenti: il quadro normativo Italiano e il confronto con alcune normative internazionali, 2021, Imready Srl
- [10] C. Pellegrino, Pipinato A, Modena C (2011). A simplified management procedure for bridge network maintenance. Structure and Infrastructure Engineering, vol. 7(5), p. 341-351, ISSN: 1573-2479, doi: 10.1080/15732470802659084
- [11] D. Zonta, R. Zandonini. F. Bortot, A reliability-based bridge management concept, Autonomous Province of Trento, University of Trento, 2005, DOI: 10.1080/15732470500315740



[12] Thompson, P., Sobanjo, J., and Kerr, R., Florida DOT Project-Level Bridge Management Models, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 8 (6), p. 345-352 , November 2003, ISSN: 1084-0702

[13] American Association of State Highway and Transportation Officials, Guidelines for bridge management systems, American Association of State Highway and Transportation Official, Washington, D.C, 2001

[14] American Association of State Highway and Transportation Officials, The Manual for Bridge Evaluation, Washington DC, 2018, ISBN: 978-1-56051-683-5

[15] Federal Highway Administration (FHWA), National Bridge Inspection Standards, U.S. Department of Transportation (DOT), 2009

[16] Liao Hsien-Ke , Mustapha Jallow, Yau Nie-Jia, Jiang Ming-Yi, Huang Jyun-Hao, Su Cheng-Wei, Chen Po-Yuan, Comparison of Bridge Inspection Methodologies and Evaluation Criteria in Taiwan and Foreign Practices, Taipei, Taiwan, 2017, ISBN 978-80-263-1371-7

[17] Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 3 Section 1 Part 4 (BD 63/07), Highway structures: Inspection and maintenance, 2007, ISBN 011552827X

[18] Peter Biber, Wolfgang Straßer, The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching, Universite de Tunis El Manar, November 2003, DOI: 10.1109/IROS.2003.1249285

[19] Mouna Attia, Yosr Slama, Normal Distribution Transform with Point Projection for 3D Point Cloud Registration, Universite de Tunis El Manar, Proceeding of Engineering and Technology, Vol. 25 p. 117-121, 2017

[20] Siyuan Chen; Debra F. Laefer, Eleni Mangina; S. M. Iman Zolanvari and Jonathan Byrne, UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions, American Society of Civil Engineers, 2019, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343

[21] Jennifer Wells, Barritt Lovelace, Improving the Quality of Bridge Inspections Using Unmanned Aircraft Systems (UAS), Collins Engineers, Inc., Minnesota Department of Transportation, July 2018

[22] Weisong Wen, Li-Ta Hsu, Guohao Zhang, Performance Analysis of NDT-based Graph SLAM for Autonomous Vehicle in Diverse Typical Driving Scenarios of Hong Kong, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2018



[23] Ji Zhang and Sanjiv Singh, LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time, Science and Systems Conference, 2014

[24] J. Zhang and S. Singh, "Visual-lidar odometry and mapping: low-drift, robust, and fast," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 2174-2181, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139486.

[25] Jung, Sungwook, Duckyu Choi, Seungwon Song, and Hyun Myung, Bridge Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle Based on HG-SLAM: Hierarchical Graph-Based SLAM, Remote Sensing 12, no. 18: 3022, 2020, DOI: 10.3390/rs12183022, September 2020

[26] Federico Corazzola, Ispezione visiva e prove di carico ponte Margherita sul fiume Volturno, 4 EMME Service S.p.A., 2016

[27] Settimo Martinello, Analisi critica dei metodi di valutazione numerica dello stato di degrado dei ponti, 4 EMME Service S.p.A., Bolzano, Gennaio 2020

[28] C. Pellegrino, Pipinato A, Modena C (2011). A simplified management procedure for bridge network maintenance. Structure and Infrastructure Engineering, vol. 7(5), p. 341-351, ISSN: 1573-2479, doi: 10.1080/15732470802659084

[29] Michael J. Ryall, Bridge Management, Taylor & Francis Ltd, 27 November 2009, ISBN: 9780429214028

[30] International Federation for Structural Concrete, Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion, CEB Bulletin No. 243, ISBN:978-2-88394-040-6, 1998

[31] Matej Kušar, Jana Šelih, Analysis of bridge condition on state network in Slovenia, University of Ljubljana, 2014, DOI: 10.14256/JCE.1047.2014

[32] M.L. Fadda, F. Mistretta, M.V. Piras, Vulnerability Assessment of Concrete Bridges using Different Methods of Visual Inspection, University of Cagliari, Civil-Comp Press, 2014

[33] Federal Highway Administration, Bridge Inspector's Reference Manual, U.S. Department of Transportation, December 2012, Publication No. FHWA NHI 12-049

[34] Parag C. Das, Management of highway structures, ICE Virtual Library, 1999



[35] Atkins, Highways Agency, CSS Bridges Group, Guidance Document for Performance Measurement of Highway Structures, CSS Bridges Group, 2007

[36] Sebastian Raschka, Machine learning con Python: Costruire algoritmi per generare conoscenza, Apogeo, ISBN: 8850333978, 2016

[37] Alessandro Maragno, Programmazione di convolutional neural Networks orientata all'accelerazione su FPGA, Università di Bologna, 2016

[38] Massaron Luca, Mueller John paul, Machine learning for dummies, Hoepli, 2019

[39] Diederik P. Kingma, Jimmy Ba, Adam: A Method for Stochastic Optimization, Published as a conference paper at the 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015

[40] Nitish Srivastava, Geoffrey Hinton, Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Ruslan Salakhutdinov, Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting, University of Toronto, Journal of Machine Learning Research 15, 2014

[41] Davide Maltoni, Reti Neurali, Università di Bologna, 2020

[42] Ç.F. Özgenel, A. Gönenç Sorguç, Performance Comparison of Pretrained Convolutional Neural Networks on Crack Detection in Buildings, 35Th International Association for Automation and Robotics in Construction, Berlin, Germany, ISBN 978-3-00-060855-1, 2018

[43] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, "Going deeper with convolutions", Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015

[44] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015

[45] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke and Alex Alemi, Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016

[46] Mingxing Tan, Quoc V. Le, EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019



- [47] Kornblith, S., Shlens, J., and Le, Q. V., Do better imagenet models transfer better?, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019
- [48] Özgenel, Ç.F., Gönenç Sorguç, A. Performance Comparison of Pretrained Convolutional Neural Networks on Crack Detection in Buildings, International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Berlin, 2018
- [49] L. Zhang, F. Yang, Y. D. Zhang, and Y. J. Zhu, Road crack detection using deep convolutional neural network, International Conference on Image Processing, 2016
- [50] Rui Fan, Mohammad Junaid Bocus, Yilong Zhu, Jianhao Jiao, Li Wang<sup>4</sup>, Fulong Ma, Shanshan Cheng, Ming Liu , Road Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Network and Adaptive Thresholding, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019
- [51] Maguire, M., Dorafshan, S., & Thomas, R. J., SDNET2018: A concrete crack image dataset for machine learning applications, Utah State University, DOI: 10.15142/T3TD19, 2018
- [52] Liang Yang, Bing LI, Wei LI, Zhaoming Liu, Guoyong Yang, Jizhong Xiao, Deep Concrete Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle Towards CSSC Database, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017
- [53] Y. Shi, L. Cui, Z. Qi, F. Meng and Z. Chen, Automatic Road Crack Detection Using Random Structured Forests, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 17, no. 12, pp. 3434-3445, Dec. 2016, DOI: 10.1109/TITS.2016.2552248
- [54] Yahui Liu, Jian Yao, Xiaohu Lu, Renping Xie, Li Li, DeepCrack: A deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation, Neurocomputing, Volume 338, 2019, Pages 139-153, ISSN 0925-2312, DOI: 10.1016/j.neucom.2019.01.036