POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

"L'intelligenza artificiale per caratterizzare il degrado del calcestruzzo nelle gallerie"

Relatore: Prof. Bernardino Chiaia

Correlatrice: Ing. Giulia Marasco

Candidato: Salvatore Aiello

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

INDICE DELLE FIGURE **4**

INDICE DELLE TABELLE **5**

INTRODUZIONE **7**

CAPITOLO 1 Piano di Assesment delle gallerie autostradali della rete di Autostrade per l'Italia SPA **9**

1.1 Progetto in atto di Autostrade per l'Italia 9

1.2 Le gallerie della rete di competenza di ASPI e i loro elementi caratterizzanti 11

1.3 Origine del Manuale delle Ispezioni adottato da ASPI 16

1.4 Metodo di valutazione IQOA 27

1.5 Risultati attuali 30

CAPITOLO 2: Il laser scanner e il georadar **32**

2.1 Laser Scanner 34

2.1 Vantaggi e svantaggi del Laser scanner 41

2.2 Georadar 42

2.3 Criticità del GPR 48

CAPITOLO 3 Definizione delle correlazioni tra parametri e fenomeni: il calcestruzzo di rivestimento **50**

3.1 Catalogo dei difetti redatto da Autostrade per l'Italia 51

3.2 Esperienza di laboratorio e i parametri misurati. 56

3.3 Risultati attuali del laboratorio e sviluppi futuri 64

CAPITOLO 4 L'intelligenza artificiale e l'algoritmo addestrato **66**

4.1 L'algoritmo 68

4.2 Pre-processing delle immagini e creazione del database 72

4.3 Deep Learning nelle gallerie e Classificazione del danno multilivello 75

4.4 Risultati e discussioni 79

4.4.1 Livello 1: Healthy/Damaged 81

4.4.2 Livello2: Anomalia/Mix Vuoti 84

4.4.3 Livello 3: Vuoti “semplici”/CLASSE C2 86
4.4.4 Livello 4: Scavernamento/distacco di calcestruzzo 90
Conclusioni 93
Bibliografia 96

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Opere d'arte di competenza di Autostrade per l'Italia.

Figura 2: Composizione interna di un tratto di galleria a titolo di esempio.

Figura 3: esempio di targa identificativa.

Figura 4: Schema di un sistema laser scanner a triangolazione.

Figura 5 : Principio di funzionamento dei sistemi distanziometrici.

Figura 1: Restituzione del laser scanner termografico che associa al quadro fessurativo della calotta della galleria anche la mappatura termica che individua in blu le infiltrazioni d'acqua.

Figura 7: Resa in scala di grigi della restituzione del laser scanner.

Figura 8: Vista 2D del profilo longitudinale della restituzione del laser scanner con una specifica sezione trasversale per quale sono richieste ulteriori misure.

Figura 9: schemi di acquisizione.

Figura 10: esempio di tavola di tipo A ed elementi interpretativi utili alla classificazione dell'algoritmo d'intelligenza artificiale.

Figura 11: Letture per trasparenza in alto a sx, d'angolo in alto a dx e superficiali in basso.

Figura 12: Relazione velocità ultrasonica – resistenza a compressione rilevata su carote (Masi, 2005).

Figura 13: Attrezzatura della Tecnotest Mod. AT315 per la prova di permeabilità rispettante la UNI EN 12390-8 presente all'interno del dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino.

Figura 14: Attrezzatura della Galbadin per prova a trazione indiretta detta “Brasiliana” presente all'interno del dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino.

Figura 15: Distribuzione Tensione vs Velocità Ultrasuoni (US) galleria Ciutti A26.

Figura 16: architettura di RESNET, nel caso con 34 layer. (He et Al., 2015).

Figura 17: esempio di radargramma filtrato.

Figura 18: Flowchart della classificazione multi-livello del danno.

Figura 19: Schema di matrice di confusione a 2 classi.

Figura 20: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 1.

Figura 21: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 1.

Figura 22: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 2.

Figura 23: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 2.

Figura 24: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 3.

Figura 25: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 3.

Figura 26: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 4.

Figura 27: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 4.

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Parametri fisico/meccanini di provini in cls prelevati da gallerie della rete autostradale italiana.

Tabella 2: Prove di permeabilità di provini in cls prelevati da gallerie della rete autostradale italiana.

Tabella 3: Matrice di confusione LIVELLO 1 , 500 elementi per classe e 70% di training-set

Tabella 4: Matrice di confusione LIVELLO 2 , 500 elementi per classe e 60% di training-set

Tabella 5: Matrice di confusione LIVELLO 3, 600 elementi per classe e 75% di training-set

Tabella 6: Matrice di confusione LIVELLO 4, 520 elementi per classe e 75% di training-set

INTRODUZIONE

La progettazione strutturale civile, fino a non molto tempo fa, raramente è stata caratterizzata dall'applicazione dei concetti di *consequence-based* design, noti invece in altri campi dell'ingegneria. Il punto di forza di questi concetti è la possibilità di evitare collassi sproporzionati, tutelare l'utenza e, possibilmente, anche la struttura stessa da eventi imprevedibili catastrofici.

L'interesse verso l'individuazione di possibili indicatori di cambiamento o sofferenza, capaci di poter fornire un "allarme" in caso di imminente pericolo, è cresciuto esponenzialmente negli ultimi anni. Per tale motivo è necessario utilizzare tutte le possibili tecnologie disponibili.

Il mondo dell'Ingegneria Civile è uno dei settori nel quale la sperimentazione e si spera presto la totale adozione, di soluzioni d'intelligenza artificiale è ancora molto indietro rispetto ad altri settori dell'Ingegneria, come quella Biomedica o Aeronautica.

Alcuni tra i vari campi di applicazione sono: la possibile ottimizzazione della pianificazione e della programmazione dei progetti di costruzione tramite algoritmi di ottimizzazione, la realizzazione di modelli predittivi del rischio, del danno e della stabilità strutturale, la possibile ottimizzazione dei processi di gestione del materiale.

Tuttavia, un altro campo per il quale si è mostrato crescente interesse è quello della diagnostica tramite immagini; il lavoro di tesi proposto ruota intorno a quest'ultimo aspetto.

Nel mese di Ottobre 2019 la società *Spea Engineering S.p.A* ha deciso di programmare ed intraprendere un piano di *Assesment* di tutte le gallerie della rete di Autostrade per l'Italia, prevedendo un dettagliato piano di azione basato su ispezioni, rilievi e caratterizzazione profonda della struttura.

Attualmente, le indagini e le ispezioni all'interno delle gallerie sono condotte tramite osservazioni visive e periodiche, prediligendo tecniche non invasive e non distruttive (Montero et Al., 2015).

Queste operazioni sono causa di problematiche quali:

- Il costo per l'assunzione e la formazione degli operatori specializzati per le attività di ispezione;
- La soggettività delle interpretazioni;

- La possibile presenza di zone pericolose per gli stessi operatori;
- Il tempo operativo elevato nello svolgimento nello svolgimento delle indagini e delle ispezioni.

Il presente elaborato ha come scopo l'addestramento di un algoritmo d'intelligenza artificiale per fornire una soluzione a tali problematiche.

Per l'addestramento sono state utilizzate le restituzioni del Ground Penetrating Radar (comunemente detto georadar, G.P.R), effettuate durante le operazioni d'ispezione da parte delle società commissionate da Autostrade per l'Italia.

Si è resa cosi possibile la realizzazione di una classificazione multilivello del danno del calcestruzzo di rivestimento di gallerie con promettenti risultati.

In tal modo vantaggi in termini di autonomia del processo interpretativo dei dati, economici, e accuratezza sono stati ottenuti.

Il lavoro di tesi è articolato in quattro capitoli. Nel primo è stato introdotto il progetto di *assesment*, della rete autostradale di Autostrade per l'Italia, del quale verranno descritti i principi, il manuale di valutazione e il manuale delle ispezioni adottati. Nel secondo capitolo sono state descritte due delle più utilizzate tecniche di indagine non invasive e il loro utilizzo durante le fasi ispettive delle gallerie: il Laserscanner e il Ground Penetrating Radar.

Il terzo capitolo è incentrato sul catalogo dei difetti adottato da Autostrade per l'Italia e l'esperienza svolta presso il laboratorio MASTRLAB del Politecnico di Torino. Qui sono state effettuate tre tipologie di prove su campioni di carote provenienti dalle gallerie sottoposte alla campagna d'indagine. Tali prove riguardano la permeabilità, la compressione e la valutazione della velocità di trasmissione degli ultrasuoni.

Nel quarto capitolo è stata effettuata un'applicazione nel campo dell'intelligenza artificiale attraverso l'algoritmo RESNET50. L'addestramento di tale algoritmo e la conseguente classificazione multilivello del degrado è stata descritta nel dettaglio e i promettenti risultati ottenuti sono stati discussi.

CAPITOLO 1 Piano di Assesment delle gallerie autostradali della rete di Autostrade per l'Italia SPA

1.1 Progetto in atto di Autostrade per l'Italia

Conoscenza, pianificazione e progettazione sono tre parole chiave atte a descrivere i complessi processi di sorveglianza e manutenzione delle opere d'arte autostradali.
Nel mese di Ottobre 2019 la società *Spea Engineering S.p.A* ha iniziato un progressivo incremento di attività di sorveglianza e manutenzione delle suddette opere, l'attività ha inoltre ricevuto un forte impulso a causa della caduta di parte di volta della Gallerie Bertè in A26, direzione Genova.
Per questo motivo Spea ha deciso di programmare ed intraprendere un piano di Assesment di tutte le gallerie della rete di Autostrade per l'Italia affiancando all'ATI, la *Lombardi Ingegneria S.r.l, Lombardi SA Ingegneri Consulenti, RockSoil S.p.a e SWS Engineering S.p.a.*
Le attività di verifica attualmente in corso riguardano 587 gallerie a livello nazionale e vengono effettuate seguendo le *Linee Guida del "CETU", Le Centre d'Estudes Des Tunnels* del governo francese, impiegate per la sorveglianza del Traforo del Monte Bianco e utilizzando le più avanzate tecnologie disponibili sul mercato.
Il piano d'azione, redatto sulla base di velocità di esecuzione, profondità e accuratezza delle indagini e sul minimo impatto sulla circolazione dei veicoli, è costituito da tre fasi:

1) Ispezione preliminare della struttura;
2) Rilievo tramite Ground-Penetrating Radar, tramite laser-scanner, termografico e fotografico ad alta risoluzione ed altre tecniche;
3) Caratterizzazione profonda della struttura.

Le attività di ispezione e valutazione dello stato di salute delle gallerie, per potere realizzare un'adeguata programmazione degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, sono regolarizzate da una serie di criteri. ASPI (*Austostrade per l'Italia*) ha, in questo modo, redatto un nuovo sistema di sorveglianza basato su attività di manutenzione e controllo, comprendendo sia ispezioni ordinarie sia prevedendo l'esecuzione di campagne d'indagini diagnostiche e l'installazione di sistemi per il monitoraggio strumentale in modalità periodica o permanente.

Il nuovo sistema di sorveglianza fa proprie le diverse esperienze positive maturate al Traforo del Monte Bianco, come la classificazione dei difetti adottata, basata sulla classificazione IQOA o l'utilizzo dello stesso Manuale delle Ispezioni per le attività di sorveglianza. Questo

manuale oltre a contenere un completo catalogo dei possibili difetti tipici che possono essere osservati nelle gallerie a seconda del materiale di cui sono costituiti i rivestimenti, fornisce delle correlazioni tra causa scatenante e difetto stesso, e suggerisce ipotesi di azione. Le Schede Identificative di Ispezione (SII) usate per le gallerie sono l'elemento fondamentale su cui si basa il Manuale adottato e a corredo delle ispezioni visive ASPI ha previsto lo svolgersi di ulteriori attività di sorveglianza tramite l'esecuzione di prove non distruttive o semidistruttive, prove di carico e indagini attraverso georadar o termografia etc.

ASPI ha previsto la definizione di due tipologie di monitoraggio da effettuare in base alla richiesta degli specialisti coinvolti nelle attività di sorveglianza, un monitoraggio occasionale/periodico o uno permanente. In base alla problematica riscontrata, se comune e frequente, si rende necessario predisporre una serie di interventi tipologici standard al fine di garantire una pronta attivazione dei lavori.

Per potere immagazzinare e studiare tutte le informazioni in questo modo ottenute, ASPI si sta dotando di un sistema di gestione documentale in grado di raccogliere ed organizzare la diversa documentazione disponibile, dalla documentazione storica (as- built), agli interventi di manutenzione ordinaria/straordinaria pregressa e non, dalla documentazione relativa ai risultati delle indagini eseguite tramite laser scanner e/o georadar alle schede identificative di ispezione con relativa relazione. Il sistema adottato dovrà fornire un support decisionale all'Ente gestore definendo i migliori flussi di lavoro e individuando i migliori scenari di manutenzione per effettuare i successivi interventi. Il sistema, definito come Tunnel Management System, ha quindi una duplice natura, una decisionale-organizzativa e una di archiviazione.

1.2 Le gallerie della rete di competenza di ASPI e i loro elementi caratterizzanti

In Italia circa 5 milioni di viaggiatori transitano quotidianamente sulla rete autostradale di 3.020 km gestita da Autostrade per l'Italia e dalle sue Controllate.

Sulla rete di Autostrade per l'Italia sono presenti e monitorate oltre 4200 opere maggiori tra ponti, viadotti e gallerie e 9000 opere idrauliche minori costituendo cosi più del 12% della rete autostradale complessiva.

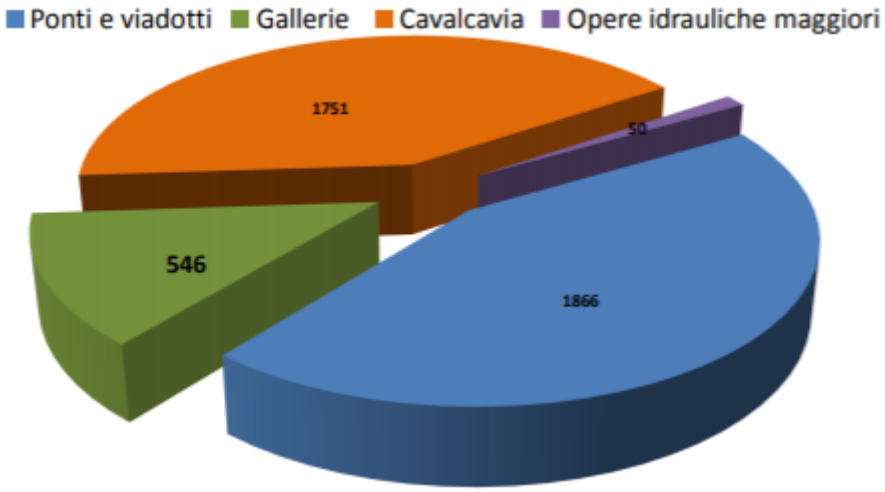

Figura 2: Opere d'arte di competenza di Autostrade per l'Italia (2011)

Il piano d'investimenti introdotto precedentemente ed in corso attualmente durante il periodo di redazione del suddetto lavoro di tesi, è caratterizzato da un impegno finanziario di circa 1.685 mln di euro (2019-2020-2021), lo scopo: potenziamento delle attività di controllo e sorveglianza e di manutenzione ordinaria della rete.

Nell'ambito della sicurezza stradale il tema assume estrema importanza delle gallerie stradali alla luce delle disastrose conseguenze che gli incidenti in queste opere procurano. I principali paesi europei, in seguito ai disastrosi incidenti accaduti nei trafori del Monte Bianco e del Tauri hanno intrapreso una serie di azioni legislative focalizzate sul problema della sicurezza in galleria. La Direttiva 2004/54/CE "Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea" è stata adottata per tali motivi dal Parlamento Europeo il 29 Aprile 2004.

Prima di andare a descrivere il piano di sicurezza è necessario caratterizzare gli elementi costituenti opere strutturali quali le gallerie.

Con il termine galleria si intendono due concetti, sia uno spazio confinato da una copertura sia, da un punto di vista manageriale, l'opera in sotterraneo con tutte le strutture ausiliari quali i sistemi di aerazione e strutture annesse.

Le gallerie sono composte da una o più fori, contente ciascuna una o più corsie di circolazione.

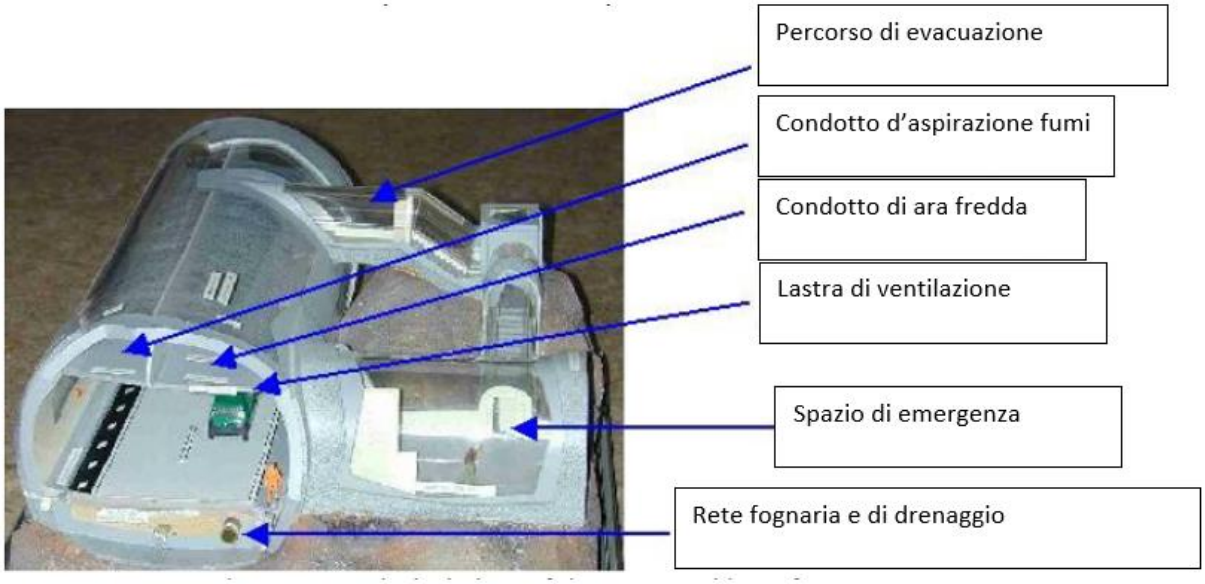

Figura 3: Composizione interna di un tratto di galleria a titolo di esempio.

Queste opere strutturali sono caratterizzate prima di tutto da un punto di entrata ed uno di uscita che prendono il nome di *portali.* Con questo termine. Tuttavia, si fa riferimento alle strutture specifiche realizzate nell'estremità dell'opera, conferendo cosi una accezione strutturale al termine.

Si individuano due tipologie di portali: naturali o "falsi". Posizionato direttamente nella facciata rocciosa il portale naturale risulta essere il più critico, essendo molto probabile la presenza di alterazioni della parete con assenza di supporti addizionali. I "falsi" portali sono caratterizzati da supporti addizionali con scopo stabilizzante, protettivo per l'utenza e la loro estensione. al di fuori della galleria, è variabile in sviluppo.

Dal punto di vista strutturale invece con il termine portale si intende un vero e proprio prolungamento all'aperto del tunnel. Queste tipologie di strutture ovviamente devono rispettare criteri di sicurezza, vincoli aereodinamici, estetici e di integrazione con l'ambiente circostante.

Le strutture ausiliari menzionate precedentemente sono costituite dalle stazioni di ventilazione, dalle strutture presenti sopra i portali e da quelle strutture, che in gallerie molto estese, fungono da portali esterni. Queste possono includere inoltre anche i pozzi di ventilazione e sistemi di aereazione intermedi all'interno del tunnel stesso.

In genere queste strutture, risultando essere molto differenti tra loro, necessitano di figure professionali in grado di svolgere ispezioni dettagliate, generalmente appartenenti a società differenti rispetto a quelle adibite per l'ispezione delle gallerie stessa.

Entrando all'interno della vera e propria galleria andiamo a definire una parte di esse caratterizzata da una sezione costante e che è in grado di descrivere il comportamento dell'intera struttura: *galleria interna* **("***tunnel interior***")**. Tendenzialmente quando si parla di gallerie trivellate, la posizione d'inizio e di fine della galleria interna è identificabile o annotata nelle relazioni dell' *as-built*. Tuttavia è comune perdere questa informazione ed in questo caso si considerano come limiti di questa zona l'estremità degli ultimi anelli annegati completamenti nel sottosuolo.

Con il termine rampa o pendenza si definisce l'inclinazione in percentuale lungo la galleria. In particolare, considerando uno sviluppo verso la direzione positiva della struttura, con *pendenza* definiamo un profilo discendente e *rampa,* se ascendente. Mentre l'inclinazione trasversale della carreggiata prende il nome di *crossfall***,** espressa anche essa in percentuale.

Durante i lavori di scavo, definiamo con il termine *overbreak* il volume di terreno scavato oltre la linea di scavo pianificato, mentre con l'*under excavation* è il volume di terreno circostante scavato all'interno dei limiti previsti.

Lungo lo sviluppo della galleria, si definisce invece con sezione non foderata, un tratto di galleria realizzato lasciando esposta la superficie rocciosa naturale. Essa può essere estesa per tutta la struttura o limitata per un numero finito di sezioni, alcune delle quali possono essere rinforzate localmente mediante bullonatura.

Con sezione foderata, invece, intendiamo un tratto di galleria parzialmente o totalmente supportato da un rivestimento interno. Esso può sia essere realizzato a stretto contatto con il suolo o talvolta è possibile accedere all'interno dello spazio che si crea tra il rivestimento e la parete rocciosa.

Un altro elemento importante da descrivere quando parliamo di gallerie risulta essere la distanza verticale (*clearance)* massima tra la superficie della carreggiata e l' intradosso della chiave di volta. Essa deve risultare per ovvie ragione minori o uguale all'altezza libera minima della struttura a cui è sottratta una tolleranza per gli effetti dinamici insieme a un margine di sicurezza.

Le pareti laterali della sezione trasversale del tunnel, che possono essere verticali o leggermente concave si definiscono come piedritti.

Nel caso in cui il tunnel attraversi un terreno di non ottima qualità, a volte, è possibile trovare, tra le due pareti laterali, una soletta di base, definita come arco rovescio con l'intento di fornire rigidità al rivestimento o per soddisfare un requisito di impermeabilità. Questa soletta di base può essere formata da una soletta piana o da un arco rovesciato in calcestruzzo, nel caso di quest'ultima soluzione eventuali deterioramenti non possono essere osservati una volta che la galleria è in uso, ma possono essere dedotti da deterioramenti o difetti nelle strutture vicine o nella carreggiata stessa.

Il rivestimento all'interno della galleria può essere costituito da mattoni, muratura o pietrisco, calcestruzzo spruzzato o calcestruzzo gettato o prefabbricato. Esso risulta essere costituito da segmenti che sono elementi prefabbricati curvi. Essi quando sono assemblati per un rivestimento circolare di una galleria realizzata tramite perforazione possono essere realizzati anche in acciaio, ghisa o ghisa sferoidale.

Elementi fondamentali sono le chiavi di volta che consentono la chiusura dell'anello di rivestimento e forniscono continuità di supporto durante l'azione di compressione.

L'elemento principe di una galleria da un punto di vista strutturale è l'arco, ovvero la porzione curva visibile del rivestimento posto sopra la carreggiata, composto da una calotta, piedritti e arco rovescio.

Spesso le gallerie sono caratterizzata del elementi atti a impermeabilizzare per evitare che le acque entrino in contatto con il rivestimento e creino deterioramenti o raggiungano la zona di servizio. Oltre a questi elementi vi sono anche altri, con la funzione di raccolta e rimozione delle acque sotterranee raccolte alla base dell' eventuale membrana impermeabilizzante. Queste tipologie di scarichi sono normalmente installati come misure correttive all'interno della galleria, mentre se è presente già una guarnizione impermeabile sull'estradosso, il drenaggio è integrato da camere d'ispezione, spesso situate in cavità.

Tutti i materiali posizionati sulla lastra di base formano il complesso della pavimentazione, esse possono essere ridotte ad una soletta monostrato in calcestruzzo, tuttavia i punti più critici di questo elemento sono i punti di appoggio dove si concentrano i deterioramenti.

La pavimentazione è caratterizzata anche da un sistema di drenaggio installato o incorporato nella soletta di base per raccogliere o rimuovere l'afflusso di acque sotterranee della pavimentazione. Oltre a questi sistemi sono presenti sistemi di drenaggio anche a livello delle banchine rigide o nelle zone pedonali che convogliano l'acqua da smaltire presso i sistemi di drenaggio della pavimentazione.

1.3 Origine del Manuale delle Ispezioni adottato da ASPI

Una lunghezza di 11.600 m suddivisa in 7.640 m in territorio francese e 3.960 m in territorio italiano caratterizza il traforo del Monte Bianco, opera strutturale realizzata congiuntamente tra Italia e Francia ai sensi della Convenzione del 14/03/1953. Questa positiva esperienza ha fatto si che ASPI decidesse di dotarsi dello stesso Manuale delle Ispezioni usato. Il manuale fornisce le indicazioni necessarie a correlare ogni difetto alla sua potenziale causa scatenante formulando ipotesi di diagnosi e proposte di rimedio.

Lo scopo di queste Linee Guida, "*Road Tunnel Civil engineering inspection guide*", è limitato alle opere come le gallerie trivellate ed esclude quelle cut-and-cover, per le quali i metodi di ispezione sono trattati nella guida pubblicata dal *"Service d'études sur less transports, les routes et leurs aménagements*".

La Linea Guida è stata pubblicata e sviluppata dal *Centre d'études des tunnel* con obbiettivo: il controllo delle gallerie della rete stradale francese non gestite da enti privati.

La guida è costituita da due volumi, il primo è atto a illustrare le raccomandazioni per stabilire le procedure per l'osservazione, l'analisi e la classificazione dei degradi che compaiono nelle varie parti della galleria. In particolare definisce che l'ispezione risulta essere lo strumento per eccellenza per un monitoraggio efficace della struttura.

Il secondo volume invece è costituito da un catalogo di tutti i deterioramenti che si possono osservare nelle gallerie, tuttavia ASPI da quest'ultimo volume ne prende le distanze andando a mettere a punto un Catalogo dei Difetti in funzione del materiale incontrato e dalla tipologia di rivestimenti. Tale documento si compone di una serie di schede difettologiche comprensive dei parametri di valutazione da adottare in fase di ispezione (Autostrade per l'Italia, 2020)

Le linee guida definiscono il significato del monitoraggio strutturale inteso come l'insieme delle ispezioni, controlli e pratiche che rivelano le condizioni attuali e qualunque mutamento da una condizione di riferimento precedente con lo scopo di definire lo stato di salute dell'intera struttura. I monitoraggi possono essere svolti in modo continuo, periodico o avvenire limitatamente a particolari eventi.

I monitoraggi periodici includono i monitoraggi annuali, valutazioni periodiche, ispezioni dettagliate periodiche e ispezioni dettagliate di alcuni elementi strutturali. Quelle legate limitatamente a particolari eventi sono ad esempio le ispezioni dettagliate iniziali, in relazione alla vita d'uso dell'opera, le ispezioni specifiche alla fine della garanzia contrattuale della vita utile dell'opera, e le ispezioni dovute ad azioni eccezionali.

Le ispezioni dettagliate iniziali permettono di definire un sistema di riferimento grazie al quale possiamo basare le successive considerazioni determinate dalle altrettanto successive analisi.

Il manuale si riferisce sia ad osservazioni semplicemente visive sia ad osservazioni integrate con prove meccaniche che possono essere ulteriormente affiancate da controlli e misurazioni. Tendenzialmente si suggerisce un controllo della struttura periodico ogni 6 anni, ma si può anche arrivare a 9 anni se si trattano gallerie molto robuste o nel caso anche ridurlo ad ispezioni triennali, biennali o annuali.

Prima della conclusione del periodo di manutenzione successivo alla realizzazione dell'opera d'arte, la struttura stessa viene sottoposta ad uno specifico sopralluogo, il cui scopo è verificarne lo stato. Tali controlli devono essere effettuati con sufficiente anticipo rispetto alla scadenza dei termini per essere coperti, se necessario, da garanzie opportune.

Il manuale fornisce inoltre le ipotetiche situazioni sul periodo quando potere sottoporre la struttura ad un monitoraggio "rafforzato" da parte del gestore dell'opera. In questa ottica vengono distinti due casi:

- Strutture speciali o innovative le quali possiedono, già durante la loro realizzazione, specifiche strumentazioni destinate per futuri monitoraggi;
- Strutture per le quali, nel caso di brusche evoluzione dei difetti osservati, il gestore dell'opera può decidere d'intraprendere effettivamente un regime di monitoraggio rafforzato.

Nel caso in cui i deterioramenti osservati sulla struttura possono andare a compromettere la sicurezza e praticità della stessa, il gestore può decidere se andare ad attuare una sorveglianza intensa, ovvero permettere un azione immediata delle autorità competenti in caso di pericolo con lo scopo di garantire la sicurezza della struttura.

Durante l'ispezione, il libro I delle Linee Guida, descrive i vari protagonisti che partecipano a tale visita. Il "proprietario" ha il potere decisionale su quando effettuare il primo sopralluogo dettagliato con la partecipazione del futuro "tunnel manager".

Di quest'ultima figura ne vengono descritte le responsabilità che si articolano su 3 livelli: strategico, organizzativo e operativo.

Il livello strategico comprende la pianificazione ed erogazione dei servizi di gestione della galleria attraverso 4 punti focali:

- applicazione della politica definita nell'ITSEOA considerando come priorità la sicurezza dell'utenza;

- messa a disposizione di adeguate risorse umane e finanziarie proporzionate all'entità dei lavori per il raggiungimento degli obbiettivi;
- definizione delle fasi per l'attività di manutenzione e riparazione sulla base di un'analisi che tenga conto delle priorità teoriche, della buona pianificazione, dei vincoli operativi e del disturbo all'utenza;
- Monitoraggio che siano stati instituiti controlli efficaci.

Il livello organizzativo predispone il possesso di un programma per i sopralluoghi scandito nel tempo in modo opportuno. Permette inoltre la messa a disposizione di tutti i documenti necessari per l'intervento e fornisce, dove necessario, informazioni e istruzioni nel caso di interventi particolari.

Questo livello analizza i degradi strutturali e gli eventuali difetti delle apparecchiature per valutarne la gravità e per identificare eventuali interventi di urgente manutenzione.

L'ultimo livello è quello operativo, lo scopo è quello di intervenire sulle strutture per eseguire o gestire le operazioni di monitoraggio, manutenzione e riparazione. Lo scopo è anche quello di effettuare ispezioni annuali, organizzare ed eseguire la manutenzione ordinaria e specialistica. Inoltre attraverso una registrazione permanente degli eventi provvede a un monitoraggio continuo formando una sorta di resoconto della storia della struttura.

Per quanto riguarda le gallerie che si trovano al di fuori della rete stradale nazionale o non sono gestite da privati, le ispezioni dettagliate possono essere affidate a un organizzazione che fa parte della società. che gestisce la struttura stessa. Ovviamente essa deve essere tale da essere condotta da tecnici adeguatamente qualificati nel settore e inoltre devono possedere una formazione specifica sulle ispezioni in galleria.

Successivamente il manuale descrive le singole componenti di un opera strutturale come le gallerie per poi andare a soffermarsi nel capitolo successivo sui difetti e gli ammaloramenti che possono essere osservati durante l'ispezione di una galleria.

Come detto all'inizio di questo capitolo il catalogo dei difetti è affrontato nel secondo libro del manuale ma qui vi è un'introduzione sia dei concetti e della loro natura.

Prima di tutto bisogna definire la differenza tra *difetto e degrado*.

Il difetto è il risultato di un'attività eseguita male o di specifiche non eseguite correttamente, non è altro che un'imperfezione che può manifestarsi, sia in modo visibile o meno, ed interessare diverse estensioni della struttura. Tendenzialmente il difetto non determina gravi conseguenze ma può far parte di una problematica più ampia.

I difetti più comuni a titolo di esempio sono:

- Difetti nell'aspetto del rivestimento;
- Difetto di allineamento nella muratura o dei bordi tra i vari segmenti durante la costruzione;.
- Difetto nel cassero che può essere replicato su ogni anello;
- Difetto di allineamento in vecchie gallerie non rivestite sorto durante la costruzione;
- Blistering o affioramento di bolle all'estradosso;
- Formazione di fessure e lesioni;
- Formazione di microfessure o cavillature diffuse;
- Honeycomb , formazione di segregazioni e nidi di ghiaia;
- Essudazione del calcestruzzo.

Con il termine degrado invece intendiamo qualsiasi problema che possa interessare un elemento o una parte della struttura e che si manifesta gradualmente o improvvisamente. Semplicemente il degrado lo si definisce come un sintomo, molto diverso dal difetto che è un'imperfezione casuale o sistematica. Le possibili cause di un degrado possono essere molteplici, principalmente sono l'alterazione dei materiali, delle strutture, il comportamento del terreno circostante e la possibile azione dell'acqua.

Il degrado o ammaloramento, che può essere sia continuo, periodico o ciclico, può presentarsi in tre fasi distinte:

- "former problem": rappresenta le riparazione che hanno soppresso la causa del problema nonostante siano ancora visibili le tracce;
- Dormiente: fase durante la quale un minimo cambiamento delle condizioni al contorno e locali potrebbe riattivare il degrado;
- Attivo: fase durante la quale, come indica il nome stesso, il degrado è manifesto e le condizioni sono tali da impedirne il suo diventare dormiente.

In genere questi degradi o difetti si concentrano in zone nevralgiche della struttura nonostante le attuali tecniche di progettazione e costruzione sono tali da permettere la realizzazione di opere che rispondono in modo positivo ai requisiti di stabilità imposti per ragioni operative e di sicurezza. Tuttavia le soluzioni quali la realizzazione di controsoffitti o pareti divisorie, ad esempio all'interno di un condotto di ventilazione, possono presentare delle criticità a livello progettuale, costruttivo o funzionale. Motivo per il quale risulta essenziale l'ispezione. Essa è un approccio basato principalmente sull'osservazione e la descrizione, la chiave di lettura ottimale risulta essere la correlazione tra i diversi aspetti e successivamente tra gli effetti scatenanti.

Il manuale sottolinea inoltre un importane aspetto circa la falsa correlazione tra la gravità di un difetto o degrado e la sua ampiezza. Questo fatto sfocia nel considerare come prima azione lo stabilire le varie gravità e conseguenti priorità. Passo fondamentale è la ricerca dell'origine

di tali degradi o difetti e il loro evolversi nel tempo considerando la loro gravità dipendente da una combinazione di cause interne, legate alle caratteristiche intrinseche dei materiali di rivestimento, e di cause esterne, legate all'ambiente e del terreno circostante o alle funzioni della struttura. Inoltre dato che la comparsa tardiva dei degradi richiede sempre un ritorno e un analisi delle condizioni di progetto della struttura, è indispensabile la consultazione dei registri dell'*as-built,* preparati al termine del periodo di costruzione dell'opera.

Uno dei più comuni fili conduttori tra le varie cause degli ammaloramenti è in genere l'influenza dell'acqua. Essa compare all'interno della struttura e, a seconda della sua percentuale, possiamo andare a descrivere le zone in diverso modo:

- Zona umida: è caratterizzata dall'assenza di flusso e si genera tendenzialmente intorno alle fessure, giunti o in prossimità di qualunque altro difetto del rivestimento;
- Infiltrazione: è caratterizzata da un leggero flusso sulla superficie, senza però essere in grado di localizzare la sorgente o le sorgenti;
- Afflusso di acqua: sorgente identificabile che genera un flusso d'acqua che è possibile misurarlo in portata.

Dopo aver definito il degrado e il difetto, le linee guida provvedono a fornire un'anticipazione e spiegazione sulla struttura delle schede del catalogo dei difetti. Provvisto di 47 fogli, il catalogo descrive i più importanti degradi e difetti osservati nelle gallerie stradali e i rispettivi modi per identificarli. Il fine è quindi identificare e diagnosticare le condizioni della struttura a seguito di degradi e difetti. Le cause più comuni che generano i meccanismi per portano al degrado sono:

- *Condizioni idrologiche, geotecniche e geologiche dell'ammasso roccioso* circondante la sezione del tunnel, i quali possono danneggiare l'estradosso nel caso di rivestimento o direttamente degradare le pareti della galleria. Si identificano tre casi :
  1) Nel caso di gallerie con assenza di rivestimento, il degrado dei giunti o della matrice rocciosa, a causa delle condizioni geologiche e geotecnica, possono causare la caduta di blocchi;
  2) Nel caso di gallerie con rivestimento non recente, il degrado si manifesta a causa della presenza di vuoti originariamente presenti poiché eventuali spazi vuoti possono creare un accumulo di tensione causando danni permanenti;
  3) Nel caso di gallerie con rivestimento recente, le attuali tecniche di costruzione mirano a confinare rapidamente il terreno scavato da un sistema di supporto. Tuttavia i rivestimenti sono progettati per resistere a tutte le sollecitazioni senza tenere conto del sistema di supporto stesso.
- *Difetti nella progettazione o nell'uso dei materiali che costituiscono la galleria,* sebbene gli attuali metodi di ricerca, di sviluppo delle tecniche e di sviluppo delle attrezzature consentano di ridurre l'incertezza nei progetti e nella loro esecuzione. In questa ottica

assume vitale importanza l'*as-built*. In assenza di questo documento o comunque delle informazioni citate, il manuale suggerisce di basarsi esclusivamente sull'osservazione e sullo studio di casi simili. In genere difetti o degradi, causati da problematiche a livello di progetto, sono comuni quando si trattano gallerie non recenti, la cui progettazione potrebbe essere basata su indagini minime e conoscenze geotecniche limitate, dove il feedback delle strutture vicine governa la progettazione della strutture in questione. Ad esempio nel caso di gallerie non recenti, l'uso diffuso di strutture portanti, formate da tralicci temporanei durante la realizzazione del rivestimento, provocava un rilassamento eccessivo delle tensioni nel tempo a volte anche molto dopo lo scavo stesso, rilassamento origine di degradi del rivestimento stesso. Questo tendenzialmente non si registra nel caso di gallerie moderne, dove l'installazione di una struttura di sostegno del rivestimento immediata impedisce la diffusione di un rilassamento delle sollecitazioni.
Per quanto riguarda invece degradi causati da un non corretto uso dei materiali, si sottolinea che una galleria la si potrebbe considerare come una sorta di dreno in una formazione rocciosa. I materiali di cui è costruito sono quindi soggetti al flusso dell'acqua che può essere permanente o temporanea. Nelle vecchie strutture, gli intonaci con malta o lamiere installate sull'estradosso erano le uniche forme di protezione contro gli afflussi di acqua. Le strutture più moderne, al contrario, dispongono di un'ampia gamma di sistemi di impermeabilizzazione e drenaggio che richiedono specifiche tecniche di installazione, insieme ad un'attenta ispezione e manutenzione per tutta la vita della struttura.

- *Fattori legati alla vita in esercizio dell'opera* i quali possono andare a causare difetti e degrado sul rivestimento della galleria. Agenti chimici come la carbonatazione, reazione dei solfati, reazioni alcaline e l'attacco dei cloruri sono deleteri per il calcestruzzo di rivestimento delle gallerie. In servizio non è da trascurare l'azione del traffico i cui effetti possono essere considerati continui, accidentali o eccezionali.
  Indipendentemente dall'importanza del percorso del traffico o dalla complessità della struttura, deve essere applicato un monitoraggio regolare e formalizzato. In effetti, una galleria è uno spazio ristretto in cui qualsiasi incidente può rapidamente degenerare in proporzioni pericolose in termini di sicurezza. Tale monitoraggio deve essere applicato sia alla struttura che alle attrezzature e deve consentire una corretta gestione delle operazioni di manutenzione ordinaria richieste. Purtroppo non sempre vengono seguite le raccomandazioni riguardanti la sorveglianza continua e la manutenzione ordinaria e ciò si traduce inizialmente in un pericolo per gli utenti, poi in un degrado di alcune parti della struttura che porta allo sviluppo di deterioramenti importanti che avrebbero potuto essere evitati o rilevati in precedenza.

La domanda che ci si pone ora è come potere analizzare i fenomeni di degrado che si sono riscontrati o che si pensano ci siano.

Occorre andare a rispondere a delle domande ben precise che ci si deve porre prima dell'analisi dello stato di una struttura: quali sono le cause del degrado, come essi possono evolversi nel tempo e il loro grado di urgenza in termini di azioni da intraprendere. Prima d'intraprendere infatti le analisi, occorre una pre-diagnosi dove vengono elencate le ipotesi circa l'ammaloramento con rispettive risposte preliminari. Solo successivamente ci si appresta ad identificarlo e tracciare la sua evoluzione nel tempo.

Durante la fase preliminare un'azione fondamentale è la divisione della galleria in conci d'ispezione, ovvero una parte di struttura avente caratteristiche strutturali simili e che presenta stessi sintomi di degrado. Vantaggio di questa azione è potere concentrare, sin da subito, le operazioni direttamente nelle zone nevralgiche e lavorare in modo sistematico e inoltre consente di correlare i degradi osservati con le varie strutture disposte lungo lo sviluppo della gallerie in esame, permettendo quindi una diretta correlazione tra settore/area e tipologia di degrado/i. Al termine di un'operazione di ispezione ci si pone davanti a due situazioni possibili:

1) Problema della struttura identificato e diagnosi preliminare valida tale da potere capire e definire una diagnosi complessiva del problema;
2) Cause del degrado non sono manifeste ma la situazione è tale da essere preoccupante, la mancanza di informazioni non permette la definizione di una diagnosi chiara e precisa.

Per arrivare ad una diagnosi finale a volte occorrono anche diversi anni se dovesse essere necessario un lavoro di indagine dettagliato. Essa deve essere tale da consentire la progettazione delle fasi di riparazione e riabilitazione dell'opera e deve comprendere:

- Cause dei degradi rilevati e discussione delle varie ipotesi;
- Velocità di mutamento nel tempo;
- Rischi correlati.

Le operazioni da intraprendere durante l'assesment di una galleria sono:

- Descrizione della struttura in termini di geometria e condizioni al contorno;
- Definizione delle operazioni di indagine e sondaggi;
- Diagnosi ;
- Progetto di riabilitazione;
- Lavori;
- Conclusione.

Durante la fase preparatoria all'ispezione è necessario concordare congiuntamente tra le varie parti interessate il periodo d'intervento in loco generalmente in periodi durante i quali è possibile una chiusura totale al traffico della galleria senza troppi disagi. Soprattutto come detto precedentemente ricopre ruolo fondamentale lo studio della galleria sotto tutti i suoi

aspetti attraverso documentazione relativa contenuta all'interno dell'*as-built* e nel caso di una galleria già ispezionata è fondamentale consultare i documenti relativi a eventuali lavori effettuati dopo il sopralluogo precedente e le rispettive valutazioni annuali. Il compito dell'ispettore in questa fase risultare quindi essere quello di accertarsi che tutti i documenti in suo possesso siano atti a potere definire un solido background della struttura. I documenti devono essere realizzati in formato digitale e nel caso di rilievi relazioni su carta devono essere stampati con opportune scale (1/100) per potere essere facilmente manipolati. Da acquisire sono anche le ispezioni preliminari eseguite nel caso del piano di Assessment di Autostrade per l'Italia dal Raggruppamento Proger-Bureau Veritas-Tecnolab-Tecnopiemonte. e le tutte le possibili indagini effettuate tramite laser scanner, georadar, ecc.

Nella fase preparatoria della galleria si dovrà procedere con il lavaggio della stessa in modo da rendere meglio visibile la superficie di calcestruzzo dei rivestimenti, azione che deve precedere la fase ispettiva per permettere di considerare l'acqua del lavaggio completamente drenata o asciugata.

Lungo lo sviluppo della galleria per potere facilitare l'individuazione dei conci d'ispezione della galleria il gestore della struttura deve assicurarsi che vi sia una marcatura progressiva e in caso contrario l'ispettore deve chiederne l'installazione prima dell'ispezione.

Il concio d'ispezione lo si definisce come la proiezione di 20 metri di galleria in direzione longitudinale la cui posizione viene individuata da una targa identificativa posta sia all'inizio che alla fine del concio ad una quota di 1,6 metri dal marciapiede. La sua posizione e dimensione deve essere tale da renderne comoda l'ubicazione all'interno della galleria e di facile individuazione durante l'ispezione.

Figura 4: esempio di targa identificativa

Una volta terminata la fase preparatoria inizia la fase esecutiva ispettiva per ogni galleria e per poterla condurre in modo agevole ed efficace vi sono delle accortezze che le linee guida delucidano.

Generalmente, l'illuminazione installata nelle gallerie non è sufficiente per efficaci osservazione, per risolvere questo inconveniente è essenziale disporre di illuminazione aggiuntiva tale da illuminare una vasta area del rivestimento. Nel caso di gallerie non accessibili da un veicolo è consigliabile l'uso di un telaio mobile su cui montare un gruppo elettrogeno provvisto di proiettori, mentre nel caso di spazi ristretti l'uso di motori a combustione interna potrebbe essere fonte di inquinamento e l'esame dovrebbe essere effettuato solo attraverso l'uso di luci portatili.

Il contatto tra intradosso e rivestimento non può essere esaminato solo dalla carreggiata, per questo motivo è utile l'uso di una autopiattaforma (MEWP), macchina selezionata accuratamente dato che dalla sua scelta dipende la qualità e velocità dell'ispezione. Altro strumento essenziale è il martello che permette di correlare il suono prodotto dal contatto con il rivestimento con la tipologia di materiale e presenza o meno di degrado o difetto che non possono essere osservati ad occhio nudo.

Assieme al martello altri strumenti che possono essere usati in questa fase di "ricerca del degrado" è il fessurimetro, uno strumento che permette di misurare l'ampiezza di eventuali fessure e di monitorarle nel tempo, di varie tipologie alcuni possono permettere misurazioni su lunghi periodi di tempo.

Per la compilazione completa del rapporto d'ispezione è consigliato l'uso di una telecamera di tipo reflex con un obiettivo grandangolare con una lunghezza focale di 18 o 14 mm per potere cogliere una superficie ampia di rivestimento e tale da cogliere dettagli come l'apertura di una fessura. Per una migliore manipolazione successiva dei dati per potere costruire dei punti di riferimento si usa un nastro di misurazione. Altri strumenti utili sono il distanziometro laser, calibro, bomboletta spray di colore giallo o arancio, tale da potere identificare eventuali approfondimenti urgenti o immediati con una sigla, dispositivi di protezione individuale di categoria III per i lavori in quota e sclerometro.

L'ispezione verrà svolta secondo la modalità del "treno ispettivo" il quale è composto da:

- Impresa addetta alla rimozione delle onduline di rivestimento con lo scopo di mettere a nudo le superfici dell'intradosso;
- Team ispettivo;
- Impresa addetta al rimontaggio delle onduline;
- Team ispettivo per eventuali approfondimenti sul rivestimento.

L’ispezione di un arco è preferibile iniziarla da terra da ciascun piedritto e con un passaggio in quota in una cesta aerea per la parte del soffitto, le targhe di segnalazione che si andranno a disporre forniscono un sistema di riferimento rapido e preciso per le varie valutazioni da parte dell’ispettore.

Le Schede identificativa d’ispezione non sono altro che l’indagine in cui l’ispettore mette insieme i vari deterioramenti, l’indagine di base viene decisa durante la prima ispezione e successivamente viene aggiornata grazie ai rapporti di osservazione realizzati duranti i vari sopralluoghi.

L’ispettore deve tenere presente che un problema al rivestimento superficiale o alla protezione non dà indicazioni sullo stato della struttura sottostante e per questo motivo si deve chiedere al gestore della struttura di rimuovere gli elementi rilevanti per accedere alla struttura sottostante.

Accanto all’ispezione della struttura in se come elemento strutturale, l’ispezione ovviamente comprende anche tutte le strutture associate quali la carreggiata, marciapiedi, sistemi di drenaggio delle acque superficiali, portali e le strutture immediatamente presso il suo intorno.

Tuttavia spesso la galleria ha diverse aeree di difficile accesso e se vi è il sospetto di un potenziale degrado nelle suddette zone, il gestore della struttura deve permettere la loro fruizione all’ispettore e tutte le risorse necessarie per eseguire un esame completo.

Ogni problema che viene identificato viene valutato e contrassegnato con due punti metrici che ne indicano l’inizio e la fine.

L’ispettore, indipendentemente dalle informazioni già acquisite deve, successivamente all’ispezione, registrare i dettagli strutturali e gli ammaloramenti osservati. Per quanto riguarda i tratti di galleria sprovvisti di rivestimento l’ispezione sfocia in un vero e proprio rilievo geologico dove la priorità è data alla ricerca di un potenziale dissesto roccioso.

I dettagli sopradetti vengono raccolti in un rapporto sulle osservazioni e correlato da un parere preliminare viene consegnato al responsabile della struttura.

Una volta terminata la fase ispettiva si svolgono tutte le attività che formano la fase conclusiva. In base alle indicazioni riportate dall’ispettore partono le varie operazioni d’urgenza e le varie azioni per permettere una accelerata apertura dell’opera d’arte al traffico tra cui i vai interventi di messa in sicurezza saranno decisi da un tavolo tecnico progettuale. Le Schede Identificative d’Ispezione precedentemente introdotte dovranno essere completate e contenere:

- Data dell'ispezione;
- Orario della stessa;
- Tratta autostradale;
- Il nome della galleria e direzione;
- Tipologia di struttura esaminata;
- Personale presente;
- Nome e firma degli ispettori;
- Timbro dell'impresa;
- Note.

L'ispezione condotta deve essere tale da potere essere interpretata senza alcuna ambiguità da chiunque abbia bisogno di consultare i documenti e in conclusione deve essere definita una politica coerente per il monitoraggio e la manutenzione. Scopo del manufatto da redigere è quello di riferire con la massima precisione possibile al gestore della struttura lo stato della stessa

Alle schede identificative è previsto che si alleghino elaborati AutoCad e report dell'ispezione.

Il libro I di queste Linee Guide è stato completamente adottato ed adattato per redigere il Manuale delle Ispezioni adottato da Autostrade per l'assesment delle sue gallerie. Il Catalogo dei difetti invece si discosta dalle Linee Guida del Cetu dato che descrive tutti i difetti tipici che possono essere osservati nelle gallerie a seconda del materiale di cui sono costituiti i rivestimenti. L'ispezione preliminare delle gallerie è svolta dall'ATI Proger S.p.A, Bureau Beritas Nexta, Tecnloab e Tecno Piemonte nell'ambito delle attività di sorveglianza delle principali opere d'arte della rete Aspi.

Lo scopo dell'indagine preliminare nel caso di Autostrade per l'Italia ,oltre a quanto esplicato precedentemente, risponde all'obbiettivo di marcare una netta differenza con la precedente gestione Spea con lo scopo di avviare una nuova fase ricognitiva.

Questo consentirà di potere avere un quadro generale circa il controllo della stabilità della struttura e della tenuta di tutti i rivestimenti installati lungo la galleria per la captazione e convogliamento delle acque d'infiltrazione prima della effettiva conclusione del piano di Assesment. (Centre d'Etudes des Tunnels, 2015)

1.4 Metodo di valutazione IQOA

L'ispezione di una struttura è un approccio che si basa sull'osservazione e la descrizione del difetto o ammaloramento. Lo scopo è dato dall'individuazione e dal rilievo di esso, più che andare a definirne la causa o i fattori scatenanti, per questo motivo il fine di una ispezione è di andare a definire lo stato di salute di un'opera.

La restituzione di questo stato di salute si basa sulla Classificazione IQOA, *"Image qualité des ouvrages d'art"*, che rappresenta il sistema di classificazione ampiamente descritto nelle Linee Guida del Centre d'Etude des Tunnels e conforme alle prescrizioni delle circolari del Ministero LL.PP. n. 6736/71 del 19.7.1967 e n. 34233 del 25.02. 1991 applicato sia durante il Traforo del Monte Bianco che per altri trafori internazionali. Inoltre il documento 40 del "*Tunnels- Civil engineering works and equipment"* dell'Ottobre 2012 conforme all'ITSEOA, richiede che la classificazione venga ripetuta ogni tre anni e che venga aggiornata se le analisi svolte lo dovessero giustificare.

La classificazione è costituita da una prima parte che permette la classificazione dei difetti degli elementi civili mentre la seconda mette in luce la classificazione delle venute d'acqua.

Questa classificazione consiste nell'assegnare un codice alfanumerico alle varie lesioni, quadri fessurativi e alterazioni, se trattiamo la parte civile, individuandone in questo modo le gravità, pericolosità in relazione alle quali è possibile programmare l'intervento nel tempo.

Anche la pericolosità delle venute d'acqua viene considerata data che la sua presenza può esaltare il degrado strutturale che si manifesta a livello della matrice di calcestruzzo o sulle barre di armatura se presenti.

Tipicamente, se la presenza d'acqua dovesse presentarsi distante dai giunti costruttivi, è sintomo di quadri fessurativi ampi che devono essere opportunatamente classificati. Le parti in cui ci si concentra per la valutazione delle venute d'acqua sono la sezione del tetto, lungo i piedritti e lungo la carreggiata.

Le classificazioni assegnate per descrivere le venute d'acqua sono:

- Classe 1: nel caso non si presenta nessun problema strutturale ma solo presenza di umidità. Le aree classificate con questa denominazione secondo l'IQOA richiedono solo manutenzione ordinaria e manutenzione preventiva specializzata con reti di drenaggio e controllo dell'inquinamento.
- Classe 2: Caso di presenza importante di acqua che potrebbe evolversi in un ammaloramento a lungo termine. La presenza di acqua si manifesta con gocciolamento,

pozzanghere locali (profondità non superiore a 5 mm), macchia d'umidità sull'asfalto o flusso continuo tale da creare un film d'acqua lungo il rivestimento.
In questo caso la sorveglianza è da svolgersi in modo regolare da parte del servizio di gestione in aggiunta alle azioni necessarie per le aree di classe 1.

- Classe 2E: caso analogo al precedente ma vi è serio rischio per l'opera d'arte perciò è indicato un rafforzamento della sorveglianza e adozione di provvedimenti. In queste aree la presenza di acqua si manifesta con un flusso continuo tale da creare un film d'acqua lungo il rivestimento maggiore di 1 mm, ingresso di acqua sottopressione, presenza di flusso continuo sull'asfalto. In questo caso si richiede un monitoraggio specifico e un'urgente manutenzione correttiva.
- Classe S: denominazione che si accosta alle precedenti nomenclature quando la presenza di acqua è tale da rendere la sicurezza dell'utenza non preservata. Sono richiesti interventi d'immediata manutenzione.

Per quanto riguarda invece la classificazione degli elementi civili, la valutazione di un difetto è definita dalla sua tipologia e severità distinguendone differenti classi:

- Classe 1: Si tratta di aree di stato apparentemente buono per le quali è richiesta solo manutenzione preventiva programmata ed ordinaria.
- Classe 2: Aree in cui son presenti difetti superficiali che tuttavia non mettono in pericolo la stabilità della struttura. In questi casi è possibile una manutenzione correttiva specializzata non urgente, oltre alla manutenzione necessaria per le aree di classe 1.
- Classe 2E: Aree che includono i deterioramenti della classe precedente tendenti a un possibile degrado ed aumento di estensione inficiando la sicurezza della struttura.
  Queste aree richiedono monitoraggi specifici e urgenti manutenzioni correttive per prevenirne il rapido sviluppo.
- Classe 3: aree con profondi degradi dove l'ammaloramento è tale da rendere probabilmente compromessa la stabilità della struttura. In quest'ottica vengono richieste misure di protezione, riparazione o rinforzo tuttavia non urgenti.
- Classe 3U: zone in cui il degrado è molto profondo e in modo proporzionale anche il danno tale da renderne compromessa la sicurezza sia a breve che a lungo termine.
  Queste tipologie di aree richiedono ovviamente misure di manutenzione opportune quali riparazioni urgenti per la conservazione a lungo termine della stabilità della struttura.
- L'indicatore aggiuntivo "S", assegnato a una delle cinque classi precedenti, viene indicato quando sono presenti specifici difetti che possono mettere in pericolo la sicurezza degli utenti e quindi è richiesto un immediato intervento.

Per potere attuare tuttavia questo metodo IQOA agli elementi civili è necessario:

1) Dividere la struttura in uno o più fori, contenti una o più corsie di circolazione;
2) Dividere i fori della struttura in sezioni;

3) Scomporre le sezioni in “parti” e “sottoparti”;
4) Valutare gli elementi che compongono le “parti” e “sottoparti”;
5) Nominare secondo la classificazione IQOA gli elementi valutati;
6) Suddividere la struttura in aree d’identica classificazione.

Queste aree tuttavia possono mutare nel tempo essendo direttamente collegate ai mutamenti dei degradi e dalle osservazioni svolte durante i monitoraggi. Le sezioni e le aree non sono altro che delle suddivisioni longitudinali della galleria di 1 metro di sviluppo e sono individuate da punti metrici che ne indicano l’inizio e fine.

Per le opere di ingegneria civile possiamo distinguere le seguenti “parti”:

- le *aree d’influenza*, ovvero l’ambiente fisico della galleria che comprende anche le caratteristiche, in prossimità delle strutture, che influenzano o possono influenzare il suo comportamento strutturale come il terreno circostante o la vegetazione presente a ridosso dei portali;
- *Struttura,* ovvero tutti gli elementi portanti di una galleria come la calotta, i piedritti e l’arco rovescio;
- *Attrezzature di ingegneria civile* per i lavori di finitura, ovvero i lavori per garantire il funzionamento, miglioramento estetico, protezione contro attacchi esterni della struttura e per garantire la sicurezza e comfort dell’utenza.

Concludendo la descrizione del metodo di classificazione IQOA, essa riporta oltre alla nomenclatura precedentemente descritta altre due possibili notazioni. “NA”, si riporta nel caso di una valutazione non applicabile quando l’elemento non fa parte della ripartizione della sezione della galleria. La notazione “NE” invece si riporta quando la valutazione non è stata effettuata, ovvero nel caso in cui la “parte” o “sottoparte” non è stata valutata tra due punti metrici. Mentre la notazione “NA” in termini di priorità si colloca inferiormente alla classe 1 sia per quanto riguarda la classificazione IQOA degli elementi civili sia per la classificazione delle venute d’acqua, la notazione “NE” non fornisce nessuna indicazione circa la condizione dell’elemento che non è stato valutato. (Centre d'Etudes des Tunnels, 2015)

1.5 Risultati attuali

Le procedure descritte hanno permesso ad Autostrade per l'Italia di fornire uno strumento per gli Ispettori e i progettisti che possa essere di supporto per il raggiungimento di un profondo livello conoscitivo dello stato di salute delle gallerie autostradali esistenti.

Acquisire un livello conoscitivo maggiore e profondo è necessario al fine di avere un appropriato livello di affidabilità delle valutazioni di sicurezza dell'opera. Livello di sicurezza che si traduce in maggiore livello di affidabilità dei modelli di calcolo, delle azioni e resistenze proprie degli elementi portanti valutate. Le incertezze intrinseche nel metodo di valutazione della sicurezza di un opera può essere ridotto prestando fede al D.M. 17/01/2018 (NTC18), corredato dalla Circolare esplicativa n.7 del Febbraio 2019, il quale al cap. 8 affronta il tema delle costruzioni esistenti.

Abbiamo visto come, per raggiungere tale livello di conoscenza, occorre condurre analisi preliminari dettagliate circa l'aspetto storico dell'opera e i vari documenti a disposizione.

Con questo scopo, le Linee Guide realizzate definiscono una serie di passaggi da seguire:

1) Definizione delle caratteristiche costruttive e geometriche del rivestimento, dalla geometria allo spessore del rivestimento stesso, alla presenza delle centine del pre-rivestimento o della presenza dell'armature in intradosso;
2) Analisi delle possibili criticità del rivestimento e della sua interfaccia con l'ammasso roccioso;
3) Verifica delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo di rivestimento;
4) Verifica delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo nella parte corticale dell'intradosso del rivestimento per la verifica degli ancoraggi di sovrastrutture;
5) Definizione dello stato tensionale del rivestimento definito ed eventuale monitoraggio delle situazioni critiche;
6) Verifica dello stato di consistenza del rivestimento coperto da reti di protezione;
7) Analisi del rivestimento mediante indagini indirette come quelle geofisiche.

Nel paragrafo precedente si è illustrato il metodo di classificazione IQOA adottato per il catalogo dei difetti ed ammaloramenti e quindi la campagna ispettiva da svolgere deve contemplare la disamina di tutte le varie tipologie. Per questo motivo sono state individuate diverse tecniche disponibili.

I laser scanner con termografia e il georadar a doppia frequenza saranno oggetto di analisi del prossimo capitolo dato che lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di proporre un algoritmo

d’intelligenza artificiale capace di individuare particolari criticità presenti nel calcestruzzo di rivestimento sfruttando i dati ottenuti da strumentazioni del genere.

Altre tecnologie usate sono:

- Videoendoscopia, capace di cogliere lo stato di consistenza del rivestimento coperto da reti di protezione;
- Carotaggi, capaci di individuare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo del rivestimento a tutto spessore;
- metodi pull-out, capace di cogliere le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo nella parte corticale d’intradosso del rivestimento per la verifica degli ancoraggi di sovrastruttura;
- martinetto piatto semplice, capace d’individuare lo stato di consistenza del rivestimento coperto da reti di protezione;
- tomografia sismica.

L’uso di queste tecnologie ha permesso e sta permettendo tutt’ora di aggiornare di volta in volta le varie schede ispettive per andare a determinare le varie azioni da svolgere.

Ad elaborare queste linee guida per la valutazione delle infrastrutture autostradali è stato chiamato a partecipare anche il Politecnico di Torino per inserirsi nel gruppo di lavoro formato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT).

CAPITOLO 2: Il laser scanner e il georadar

Nel ambito della valutazione delle condizioni strutturali di opere come le gallerie, alcune tra le migliori prove non distruttive sono l'uso del Laser scanner e l'utilizzo della tecnica del Ground-Penetrating Radar, comunemente detto georadar. Con l'utilizzo di queste tecniche è possibile ottenere:

- Ottima definizione e verifica delle caratteristiche geometriche e costruttive del rivestimento;
- Rapidità di esecuzione;
- Chiara restituzione.

Il Laser scanner permette un agevole e accurato rilievo della geometria del fornice, della piattaforma stradale, dei vari impianti e delle eventuali dotazioni di sicurezza presenti. Il georadar permette di indagare le parti non visibili: l'intero spessore del rivestimento, le eventuali gabbie di armatura e/o centine presenti e i possibili degradi.

Queste tecniche sono fondamentali anche per la valutazione di eventuali criticità del rivestimento. Il laser scanner si concentra esclusivamente su un'indagine della superficie del rivestimento mappandone il quadro fessurativo mentre il georadar è in grado, come detto prima, di svolgere un'indagine più approfondita in funzione della tipologia di antenna che si utilizza.

Il processo logico con cui si sviluppa una campagna d'indagine si articola su differenti step e a ciascuno di essi si associa una di queste tecniche. Ciò è dovuto alla necessità di rispondere, in modo esaustivo ed efficace, alle necessità degli ispettori e dei progettisti. In questo modo risulta agevole l'utilizzo di varie metodologie d'indagine per successivi affinamenti come verrà descritto nei paragrafi a seguire.

Le fasi della campagna stabilite da ASPI sono le seguenti:

1) FASE 1:
- Rilievo con il laser scanner;
2) FASE 2:
- Indagine georadar su profili longitudinali;
- Elaborazione e restituzione delle informazioni rilevate in formato draft;
- Condivisione con committente e con progettisti delle ulteriori indagini georadar da effettuare e delle posizioni di taratura;
3) FASE 3:

- Sezioni radar integrative;
- Sezioni georadar con antenna ad alta frequenza;
- Fiorettatura con videoendoscopie;
- Carotaggi;
- Pull-out;
- Prove di martinetto semplice;

4) FASE 4:

- Rapporti finali;

In questo capitolo vengono descritte le tecniche laser scanner e del Ground-Penetrating Radar per potere inquadrare l'ambito di applicazione dell'algoritmo d'intelligenza artificiale sviluppato nel quarto capitolo di questo lavoro di tesi.

2.1 Laser Scanner

La scoperta fondamentale che ha permesso l'emissione della luce laser è dovuta ad A. Einstein nel 1917. Il termine "L.A.S.E.R." è, infatti, acronimo di: *"Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"*

Il laser scanner è uno strumento elettro-ottico meccanico con lo scopo di rilevare la geometria spaziale di oggetti tramite la scansione degli stessi da parte di un distanziometro laser (Clerici et al., 2005). Elemento chiave di questa tecnica d'indagine è la luce laser che vede la sua nascita grazie ad A. Einstein nel 1917 con la scoperta del fenomeno di amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - LASER). Tuttavia bisognerà aspettare il 1958 per potere osservare il primo dispositivo laser, da questa scoperta, che possiamo definire come punto di partenza, tutte le scoperte successive sull'argomento permisero di comprendere come utilizzare la particolare emissione elettromagnetica nel campo della misura. La differenza tra luce naturale e luce laser risiede nella capacità dei fotoni di quest'ultimo nel non disperdersi in tutte le direzioni e di essere dotata di una ben definita lunghezza d'onda.

Il laser scanner è uno strumento in grado di acquisire la posizione spaziale di migliaia di punti ad altissima velocità in. modo da ottenerne un insieme che prende il nome di *nuvola di punti.* Questo insieme permette di creare, attraverso software specifici, modelli e viste di sezioni di elementi osservati.

Questa tipologia di tecnica può svolgersi attraverso due sistemi differenti:

- Sistemi a triangolazione.
  In questo caso si tratta di un sistema che si basa sull'applicazione dei ben noti teoremi geometrici di Talete sui triangoli. Nel dettaglio, il raggio laser colpisce l'oggetto dopo aver subito una deflessione rispettando un passo incrementale attraverso uno specchio rotante. La presenza di uno o più sensori d'immagine permette la ricezione del segnale riflesso. Tali sensori, in genere, sono posti ad una distanza prefissata in funzione del punto di partenza del laser prima della riflessione e della fase del raggio. La base dello strumento(caratteristica intrinseca dello stesso), l'angolo compreso tra essa e il raggio emesso e l'angolo compreso sempre tra la base e il raggio riflesso identificano il triangolo da considerare.

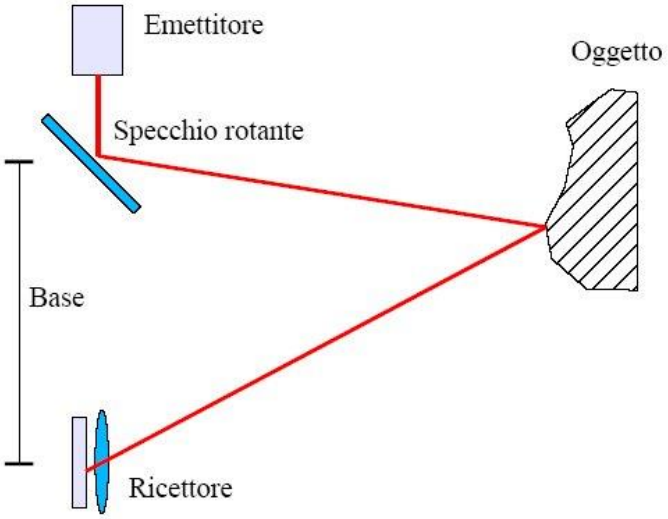

Figura 5: Schema di un sistema laser scanner a triangolazione

- Sistemi distanziometrici.
  In questo caso si utilizzano strumenti che restituiscono come risultato la misura della distanza tra il centro dello strumento e il primo punto che il raggio laser investe. Il meccanismo di funzionamento si basa sul calcolo del tempo di volo del raggio laser, ossia il tempo impiegato dal raggio laser per incontrare il punto da registrare e di tornare indietro. Durante questo intervallo di tempo vengono inoltre misurati in modo molto preciso degli angoli dati dalla rotazione di due specchi rotanti intorno agli assi y e z (asse z inteso come verticale e asse y come direzione che congiunge lo strumento all'oggetto)

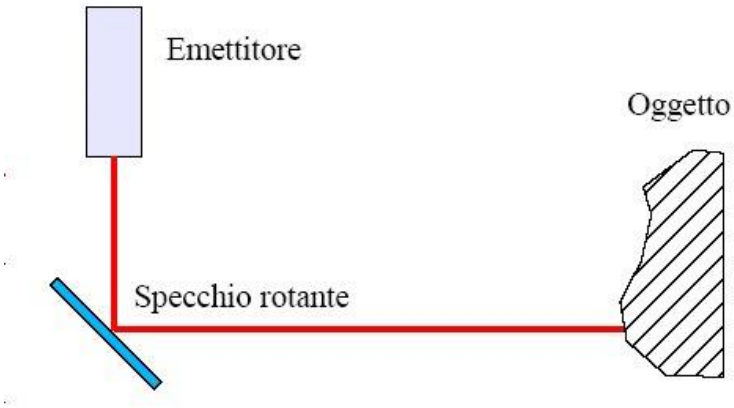

Figura 6 : Principio di funzionamento dei sistemi distanziometrici

Prima di avviare la scansione è necessario regolare i parametri che governano lo strumento come la velocità e il passo delle rotazioni. Questi influenzano tanto la risoluzione dei risultati

e la durata della scansione che può variare da circa 30 secondi fino ad una decina di minuti. Per ogni punto osservato vengono misurati:

- la distanza;
- gli angoli orizzontali e verticali in relazione alla posizione del corpo e dello specchio;
- riflettanza della superficie colpita dal laser che dipende dalle caratteristiche dei materiali rilevati;
- parametro cromatico RGB.

La distanza viene misurata attraverso la differenza di fase tra una coppia d'impulsi laser sinusoidali. I moderni laser scanner possono essere considerati come delle stazioni totali ad elevata automazione perché i punti vengono memorizzati con un sistema di riferimento interno dello strumento. Per ottenere una efficace descrizione di oggetti complessi occorrono più scansioni unificate attraverso l'uso di una rete d punti target opportunamente posizionati. Le varie scansioni effettuate conservano ciascuna il loro sistema di riferimento per cui, per ottenere successivamente un modello completo in tre dimensioni, occorre orientare tutti i modelli acquisiti secondo uno stesso sistema di riferimento attraverso la tecnica di *registrazione*. La registrazione di un modello non è altro che una rototraslazione spaziale senza una variazione del sistema di riferimento della scansione adiacente. Questo avviene con l'individuazione di 6 parametri indipendenti tra loro, 3 traslazioni spaziali e 3 rotazioni attorno agli assi principali. In parallelo alle diverse tipologie di laser scanner vi è la possibilità di installarli su mezzi motorizzati permettendo in questo modo una efficace continuità dell'acquisizione. Durante il movimento, queste tipologie di laser scanner mobili acquisiscono il dato e lo immagazzinano in tempo reale. Ciò è permesso grazie al sistema di stabilizzazione IMU e al posizionamento tramite GPS. Alcune tipologie di laser come i laser scanner 3D sono caratterizzati da un potenziamento descritto dalla presenza di una fotocamera digitale integrata che permette l'acquisizione automatica di immagini dello spazio rivelato. (CLERICI, et al., 2005)

La riflettanza degli oggetti viene colta attraverso specifici adesivi catarifrangenti detti marker opportunamente posizioni. Le dimensioni dei marker sono dettate:

- dalla risoluzione angolare imposta per la scansione;
- dalla distanza tra oggetto e strumento;
- dalla divergenza del raggio laser.

Per una corretta stima dei parametri di registrazione quando si effettuano più scansioni è necessario e sufficiente individuare la presenza di minimo di 3 punti maker, punti noti, in

comune tra le due scansioni successive. L'individuazione dei punti marker segue due fasi distinte:

1) S'individuano tutti i punti del modello 3D prodotti dal laser aventi un indice di riflettività superiore ad un minimo imposto dall'operatore, minimo ricavato dallo studio dell'immagine di riflettività predisposta dal costruttore dello strumento;
2) I punti vengono raggruppati in insiemi dato che il raggio laser può colpire più volte uno stesso marker e la sua posizione viene stimata come media pesata delle posizioni dei punti appartenenti ad uno stesso insieme.

Successivamente è necessaria una correlazione automatica dei punti di collegamento. L'obbiettivo è quello di determinare i parametri per l'orientamento di due scansioni in un unico sistema di riferimento. Questo è possibile con l'individuazione dei *marker omologhi*. Per questa ricerca il punto di partenza è supporre la verticalità dello strumento, ipotesi che permette una notevole semplificazione in termine di ricerca dei punti omologhi in quanto una parte dell'insieme dei marker visibili da una scansione corrisponde a parte dell'insieme dei marker visibili dall'altra a meno di una rototraslazione nello spazio. La prima fase è caratterizzata dall'individuazione dei punti con maggiore riflettività individuati durante la prima scansione e si considera come punto di riferimento uno di essi. Rispetto ad esso vengono calcolate le coordinate sferiche di tutti gli altri marker. Il processo omologo viene ripetuto per la seconda scansione identificando, quindi, un altro punto di riferimento e rispetto ad esso vengono calcolate le coordinate sferiche degli altri punti marker. Le diverse coordinate sferiche rispetto ai due punti di riferimento vengono confrontate valutando in questo modo un numero di coordinate uguali presenti nei due sistemi a meno di tolleranze di confronto proporzionali alla precisione del laser scanner adoperato.

Successivamente si considera un secondo punto di riferimento all'interno della seconda scansione tra i punti ad alta riflettività e rispetto ad esso vengono ricalcolate le varie coordinate sferiche che si paragonano con i risultati inerenti alla prima scansione. Vengono così calcolate nuovamente un numero di coordinate uguali a meno di tolleranze di confronto. Il processo viene ripetuto per tutti i punti individuati nelle due scansioni considerando come primo punto omologo la combinazione di punti di riferimento delle due scansioni che, paragonati tra loro, offrono il massimo numero di uguaglianze tra coordinate sferiche. Una volta ottenuto il primo punto omologo, attraverso il paragone di coordinate sferiche rispetto ai due punti di riferimento selezionati, è possibile autocorrelare tutti gli altri.

Il laser scanner adottato per la specifica campagna intrapresa da ASPI presenta anche una termocamera capace di cogliere l'intensità della radiazione emessa dai corpi nello spettro

dell'infrarosso che viene successivamente convertita in un dato di temperatura. Il motivo di questa decisione è il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- Rilievo del quadro fessurativo;
- Mappatura delle zone umide e delle zone con infiltrazione d'acqua;
- Rilievo di cavità e degradi superficiali;
- Rilievo degli impianti e di tutte le dotazioni di protezione;
- Rilievo di precisione della geometria della galleria.

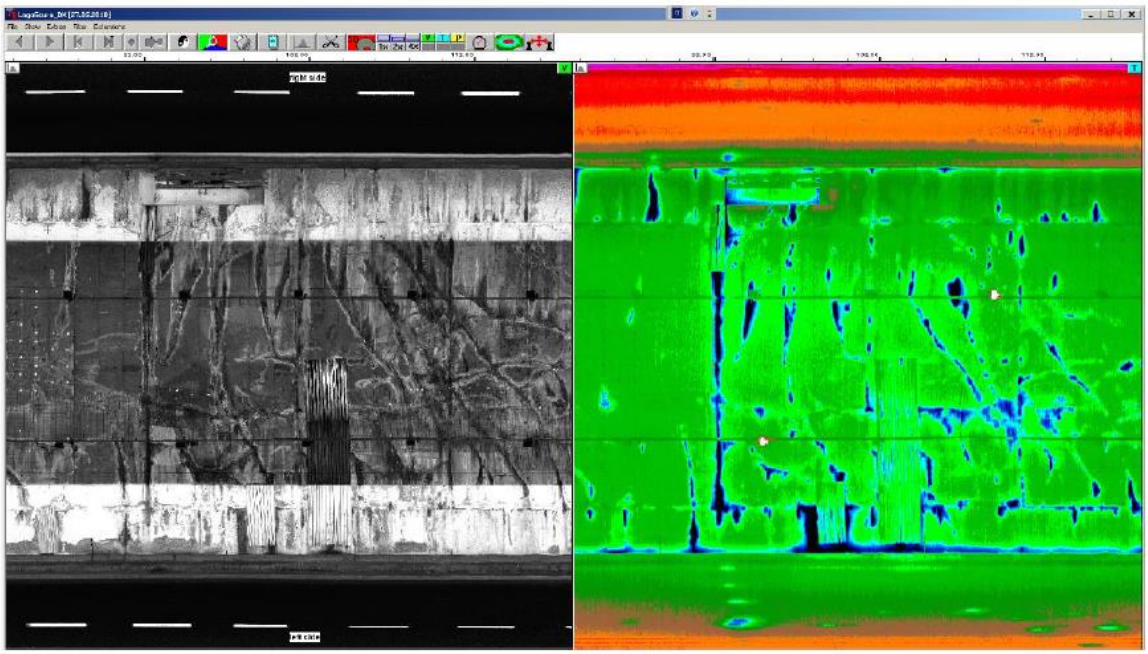

Figura 7: Restituzione del laser scanner termografico che associa al quadro fessurativo della calotta della galleria anche la mappatura termica che individua in blu le infiltrazioni d'acqua.

Per redigere le opportune correlazioni tra dato misurato e temperatura, la termocamera possiede un sistema di raffreddamento incorporato e di misura della temperatura ambientale. La temperatura è individuata tramite specifici algoritmi ed è letta attraverso un LCD o un monitor (installati sulla termocamera). Il punto di partenza è l'immagine ad infrarossi ottenuta tramite un sensore elettrico che trasforma il dato di un detector dell'infrarosso dell'energia emessa. In fase ispettiva un dato del genere, come le mappe di temperatura, è di notevole utilità per individuare disuniformità di materiali, zone di umidità ed evoluzione dei fenomeni di bagnatura ed essiccatura delle superfici.

Il laser scanner adottato da Autostrade è stato sviluppato appositamente dalla *Spacetec*, azienda tedesca, ed è stato ottimizzato nello specifico per effettuare rilievi all'interno di gallerie ferroviarie e stradali. Lo strumento in questione è caratterizzato da una tecnologia a differenza di fase con l'emissione di onde sinusoidali opportunamente calibrate per consentire la massima precisione di rilievo su distanze tipiche delle gallerie a 2 o3 corsie dato che la gettata limite massima risulta essere pari a 15 metri (fig.8)

In dettaglio le specifiche dello strumento adottato sono:

- Frequenza di rotazione continua della testa dello scanner pari a 300 Hz;
- Capacità di acquisire fino a 10000 punti per sezione;
- 200 giri/secondo;
- 5 km/h di velocità di avanzamento.

Lo strumento adottato, costituito da un corpo cilindrico e una testa rotante, è montato su un autoveicolo con lo scopo di ottenere una rappresentazione tridimensionale dettagliata al livello millimetrico di ogni singola scansione, in un unico sistema di riferimento, in maniera veloce e produttiva.

La modalità esecutiva adottata permette una notevole velocità di esecuzione. Il rilievo ottenuto attraverso le 200 rotazioni al secondo della testa dello strumento sono contemporanee sia all'acquisizione dei dati da parte del sensore termico sia al movimento dell'automezzo con una velocità constante di 5 km/h. Il punto di forza è la non necessità di possedere caposaldi o individuare punti omologhi tra le varie scansioni. La georeferenziazione del rilevo avviene in un secondo momento andando ad integrare ai risultati le coordinate assolute rilevate su specifici punti della galleria facilmente individuabili dal rilievo.

Come detto precedentemente la tecnologia laser scanner permette una descrizione accurata e un modello tridimensionale della struttura analizzata. La variazione cromatica degli elementi avviene grazie alla "traduzione" dei diversi valori di riflettività degli elementi, relazionati alle varie tipologie di materiali in codici RGB. Questa proprietà permette la resa di foto "realistiche" in quanto vi è la possibilità di visualizzare le fotografie in scala di grigi (fig.9). (Autostrade per l'Italia, 2020)

Figura 8: Resa in scala di grigi della restituzione del laser scanner.

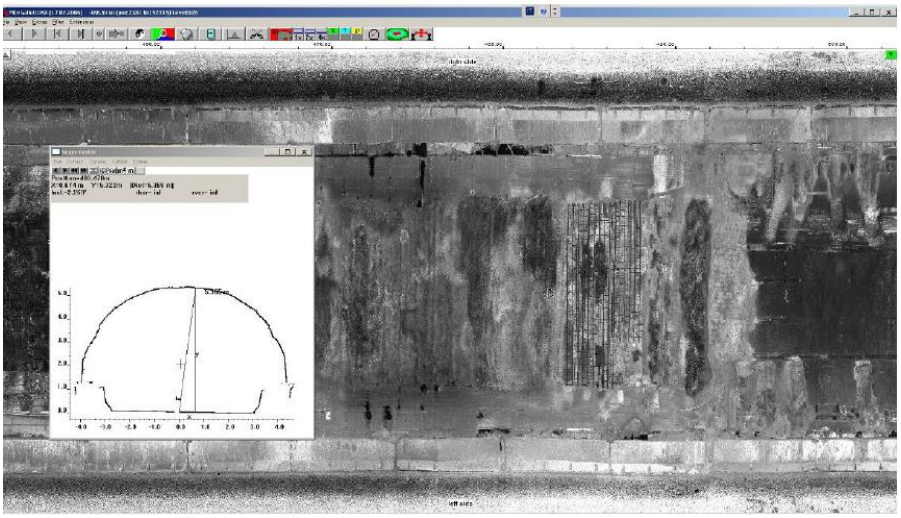

Figura 9: : Vista 2D del profilo longitudinale della restituzione del laser scanner con una specifica sezione trasversale per quale sono richieste ulteriori misure.

2.1 Vantaggi e svantaggi del Laser scanner

Come qualsiasi strumentazione anche l'utilizzo del laser scanner presenta dei vantaggi e delle criticità. Nel precedente paragrafo sono già emerse alcune peculiarità. Tra i vantaggi derivanti dall'applicazione di tale metodologia spicca l'abbattimento dei tempi di acquisizione dei dati e l'annullamento dell'errore derivante l'operatore essendo il processo automatico. Il modello 3D, realizzato con immagini in risoluzione 4k HDR inoltre permette una misura diretta e permette di smorzare o addirittura eliminare i costi per un ritorno sul sito. Oltre al tempo di acquisizione dei dati si abbatte il tempo per il rilievo e di conseguenza dell'intero arco temporale dalla progettazione alla realizzazione dell'interventi da realizzare nel caso in esame.

Altri punti di forza del laser scanner sono la possibilità di ottenere un alto livello di precisione dell'indagine, anche se si è in presenza di geometrie complesse dal punto di vista architettonico, e il controllo in tempo reale dei dati acquisiti e della loro interazione. Inoltre, si assiste ad un risparmio di costo in quanto occorre soltanto un operatore per le operazioni da eseguire.

I vantaggi fin qui descritti sono accompagnati da alcune criticità della tecnica del laser scanner. La riduzione del numero di operatori è seguito da un alto costo dello strumento e dal costo sia della formazione del singolo operatore e sia dal costo di configurazione dei vari accessori. La gestione della nuvola dei punti che si ottiene come output dallo strumento non è di facile gestione e non vi sono automatismi inerenti alla restituzione grafica degli elementi architettonici. Data la natura della scansione laser è impossibile misurare superfici fuori dal campo visivo dello scanner. Le geometrie nascoste o interne, quindi, non possono risultare visibili tramite l'uso di un laser scanner. Tale caratteristiche non permette di individuarefori, fratture o vuoti.Per questa ragione è scelto di addestrare l'algoritmo di intelligenza artificiale sfruttando le rilevazioni ottenute tramite il georadar. Un'altra presenza che causa forte disturbo durante l'utilizzo del laser è la luce ambientale che potrebbe interagire con la luce del laser ed interferire con essa. (Autostrade per l'Italia, 2020)

2.2 Georadar

Una veloce e profonda analisi dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso o dello stato di degrado del rivestimento è permessa grazie all'uso delle metodologie indirette. Regine delle quali sono le prove geofisiche che si contrappongono alle prove dirette in termini di risparmio economico e di facilità di esecuzione.

Accanto all'uso del laser scanner come introdotto all'inizio del capitolo è previsto l'utilizzo del Ground-Penetrating Radar comunemente denominato georadar. Gli obbiettivi per cui si utilizza uno strumento del genere sono i seguenti:

- Individuazione degli spessori del rivestimento e la sua tipologia e natura;
- Rilievo della presenza e la eventuale posizione della centinatura;
- Individuazione della presenza di rinforzo nell'intradosso;
- Verifica della presenza di eventuali cavità vuote all'interno e a tergo del rivestimento;
- Individuazione di eventuali presenze di degrado o non continuità al livello dello spessore del rivestimento;
- Comprensione dello stato corticale del rivestimento;
- Presenza di arco rovescio;
- Individuazione di eventuali discontinuità o lesioni all'interno del rivestimento.

Il georadar nello specifico è una particolare dispositivo che sfrutta il fenomeno della riflessione di onde elettromagnetiche ad alta frequenza. Il dispositivo è caratterizzato da due antenne, una trasmittente e una ricevente. Un impulso di tipo sinusoidale della durata di 1,5 volte il periodo viene inviato dalla prima antenna e, viaggiando ad una data velocità correlata alle proprietà elettromagnetiche del materiale penetrato, viene ricevuta dalla seconda antenna montata ad una data distanza.

Il segnale ricevuto è caratterizzato da un ritardo rispetto a quello trasmesso di una decina/migliaia di nanosecondi e questo dipende dalla distanza tra le due antenne. Attraverso il segnale acquisito lo strumento genera differenti figure 2-D caratterizzate da un asse X rappresentante la distanza in metri e l'asse Y rappresentante il tempo di ascolto del segnale. Durante l' acquisizione in movimento le antenne raccolgono i diversi radiogrammi, in punti diversi lungo la linea di azione. Questi radiogrammi vengono realizzati associando ad ogni valore di ampiezza dell'onda riflessa un codice RGB o in scala di grigi. Il profilo analizzato viene successivamente visualizzato andando a collocare uno successivamente all' altro i vari radiogrammi.

La rappresentazione tramite georadar possiede la tipica forma di un cono dato che i segnali che vengono acquisiti non provengono solo dall'oggetto posto ortogonalmente allo strumento ma anche di quelli vicino. Motivo per cui ad esempio la sezione trasversale di un tubo ad esempio verrebbe colta come un'iperbole.

Ciò su cui si basa il georadar è la possibilità di correlare delle proprietà quali la resistività e costante dielettrica a fattori fisici come la posizione e caratteristica di criticità all'interno dello spessore, presenza di zone umide, di zone non cementate o il grado stesso di compattazione. Queste proprietà differenti dei mezzi sono colte perché quando l'impulso viene emanato in un materiale, esso si propaga con una velocità ben determinata e quando incontra una superficie con proprietà dielettriche differenti dal mezzo in cui si stava muovendo viene parzialmente riflesso in superficie. In base se l'antenna ricevente il segnale è la stessa di quella che emana l'impulso elettromagnetico si parla di configurazione monostatica o configurazione bistatica, la scelta tra le due è funzione esclusivamente del grado di profondità dell'ispezione e sul grado di dettaglio.

Sul radiogramma la presenza di elementi lineari rappresentano la presenza di un'interfaccia continua rispetto alla direzione di movimento dell'antenna. Nel caso in cui l'interfaccia che l'onda rileva risulta essere di limitata estensione laterale paragonata alla direzione di moto dell'antenna, nel radiogramma essa si presenta come un'iperbole.

Per quanto riguarda la mappatura degli spessori del rivestimento e la presenza di situazioni di degrado all'interno dello stesso è previsto un georadar con antenne a doppia frequenza:

- 400-900 MHz nel caso di spessori standard;
- 200-600 MHz nel caso di spessori anormali o grosse presenze di acqua;
- >2 GHz nel caso di analisi dello spettro corticale del rivestimento.

In particolare per quanto riguarda il rilievo georadar a doppia frequenza è eseguito nel caso di ASPI da una strumentazione così costituita:

1) Unità capace di acquisizioni multicanale con le seguenti caratteristiche
- 4 canali acquisibili come minimo;
- Pulse repetition frequency: 400 KHz;
- Range tra 0-9999 nsec;
- Minimo numero di scansioni al secondo pari a 400;
- 12 Volt di alimentazione;
2) Distanze a contatto misurate con una rotella encoder;
3) Un'antenna a doppia frequenza primaria con un range di frequenza tra i 400 – 900 MHz;
4) Un'antenna a doppia frequenza secondaria con un range di frequenza tra i 200 – 600 MHz.

La strumentazione invece relativa al rilievo con un'antenna ad alta frequenza (>2GHz) è cosi descritta:

1) Unità capace di acquisizioni multicanale con le seguenti caratteristiche
- 4 canali acquisibili come minimo;
- Pulse repetition frequency: 400 KHz;
- Range tra 0-9999 nsec;
- Minimo numero di scansioni al secondo pari a 400;
- 12 Volt di alimentazione;
2) Distanze a contatto misurate con una rotella encoder;
3) Un'antenna con una frequenza maggiore di 2 GHz.

In funzione delle dimensioni delle gallerie oggetto di indagine è stato previsto l'utilizzo del rilievo georadar su un minimo numero di profili longitudinali, in particolare è stato deciso tra ASPI e i professionisti che si sono occupati di queste indagini di analizzare particolari profili in relazione al numero di corsie per senso di marcia.

Nel caso di gallerie a 2 corsie di marcia si dovranno sottoporre ad indagine georadar 3 profili longitudinali in corrispondenza di un angolo pari a +/- 45° dalla chiave di volta, (cerchi in magenta in figura 9, sinistra) e pari a 5, analoghe alle precedenti, nel caso di gallerie a 3 corsie per senso di marcia (cerchi in magenta in figura 9, destra). (Autostrade per l'Italia, 2020) (Autostrade per l'Italia, 2020)

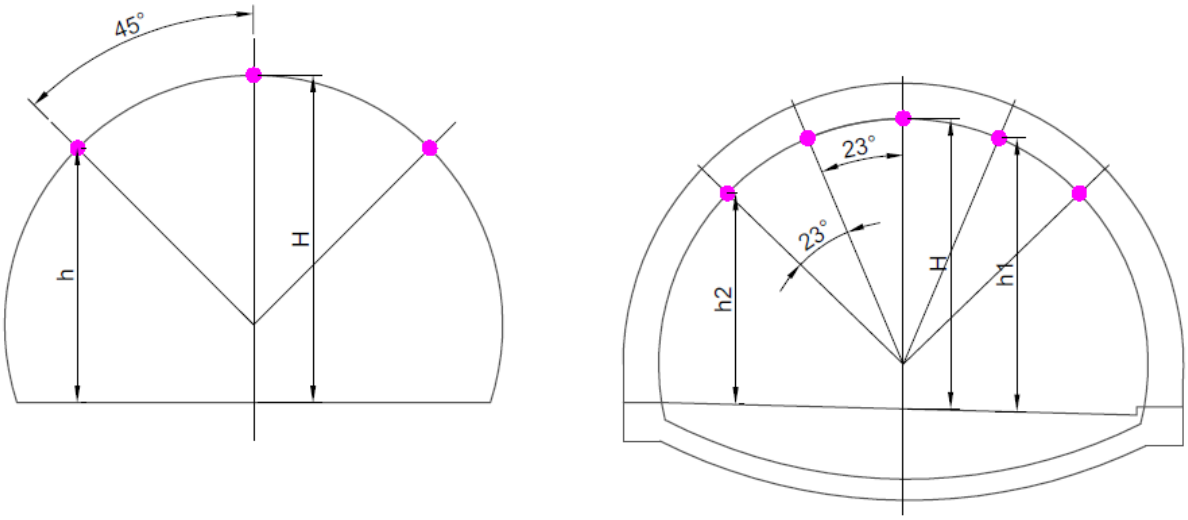

Figura 10: schemi di acquisizione

Per la realizzazione dell'algoritmo, descritto nel capitolo 4 di questo elaborato, si sono utilizzati porzioni di radiogrammi ottenuti con entrambe le strumentazioni.

Durante la fase di analisi e restituzione del radiogramma, la tecnica del georadar è caratterizzata inoltre dalla posizione del radiogramma stesso sempre univocamente definita. Lo scopo di tale scelta è dato dal posizionamento spaziale corretto delle anomalie rilevate.

Durante la fase di redazione del verbale di cantiere dovranno essere annotate:

- Ragione sociale fornitore;
- Data di esecuzione del rilievo;
- Generalità del tecnico operatore;
- Generalità della galleria in esame;
- Specifiche dell'antenna radar usata;
- Posizione del profilo;
- Punto kilometrico d'inizio e fine sezione della galleria;
- Nome del file;
- Note eventuali.

Il dato G.P.R acquisito viene visualizzato attraverso una modalità B – scan. Essa non è altro che la visualizzazione che abbiamo fino ad ora definito radargramma ed è una rappresentazione bidimensionale delle riflessioni esistenti nel mezzo sottoposto ad indagine.

Prima di utilizzare il radargramma per identificare i possibili degradi, dopo l'acquisizione essi contengono un "rumore" o "interferenza" determinando una grossa difficoltà nell'interpretazione. È necessario trattare prima dell'interpretazione i radargrammi per eliminare il rumore e correggere le scale orizzontali e verticali. Per fare questo vengono utilizzati particolari filtri, esempi di software utilizzati in questa fase dalle società di competenza sono: GRED HD 1.6.0. E GRED BASIC 02.01.029.

La restituzione di un rilievo georadar è composta da una relazione generale completa dei datasheet delle strumentazioni usate e delle modalità di esecuzione del rilievo. La relazione è corredata da quattro tipologie di tavole entrambe di formato A3: base, tipo A, tipo B e tipo C. Le tavole base contengono i radiogramma in scala di grigio rappresentando le correlazioni tra distanza e profondità, le tavole di tipo A aggiungono alla correlazione precedente elementi interpretativi individuati su layer diversi, le tavole di tipo B contiene soltanto le sezioni interpretative e le posizioni di taratura. L'ultima tipologia, quella di tipo C, contiene concludendo la restituzione finale post- taratura.

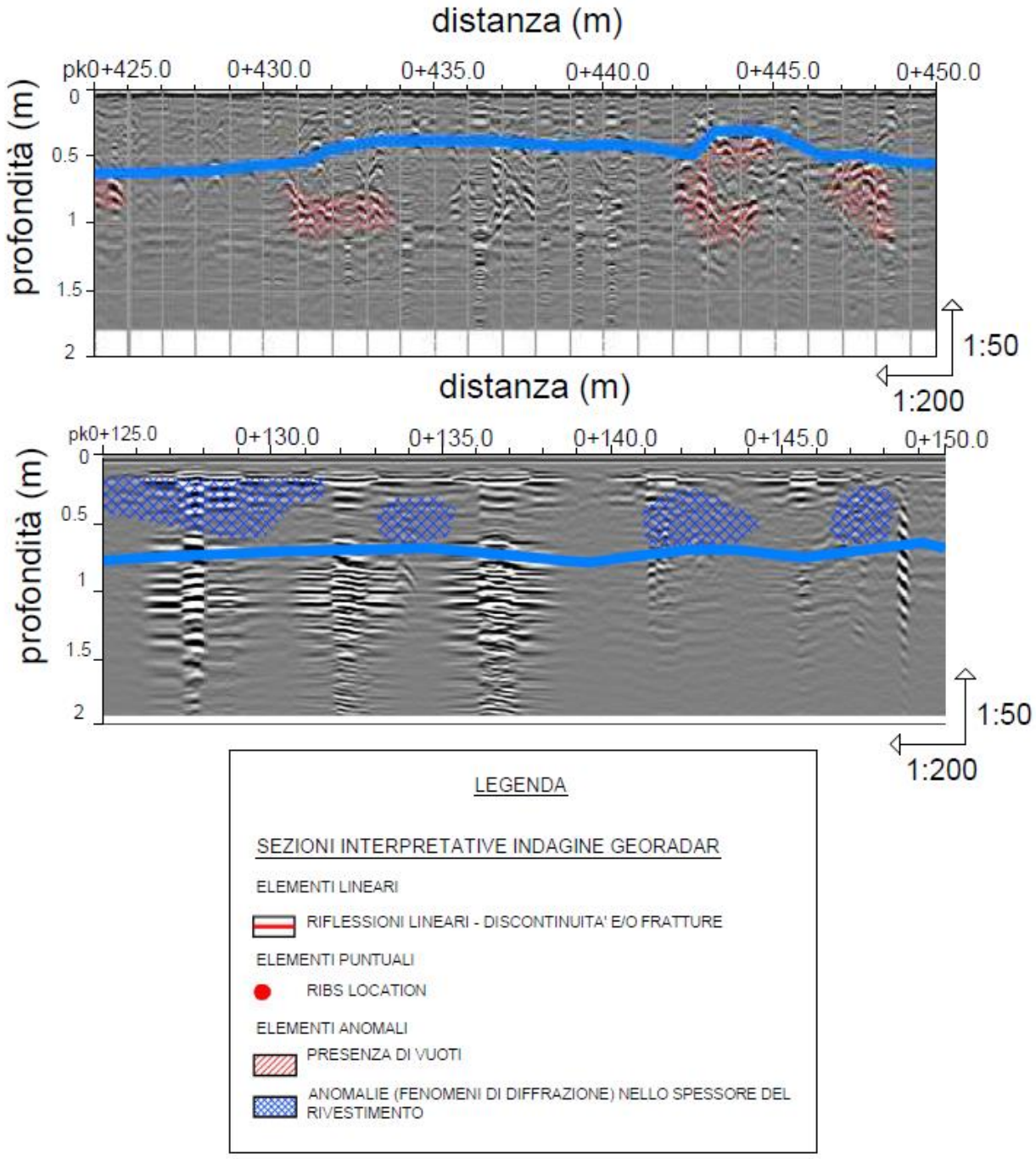

Figura 11: esempio di tavola di tipo A ed elementi interpretativi utili alla classificazione dell'algoritmo d'intelligenza artificiale

Gli elementi interpretativi presenti e utilizzati successivamente per la classificazione dell'algoritmo d'intelligenza artificiale sono:

- Elementi anomali, nel caso di possibili vuoti o anomalie nello spessore del rivestimento;
- Elementi puntuali, nel caso di centine presenti;
- Elementi lineari per indicare eventuali discontinuità e/o fratture.

Tuttavia durante l'applicazione del georadar si nota immediatamente che vi sono delle situazioni che lasciano trapelare alcune criticità circa l'applicazione di questa tecnica. Criticità, descritte nel paragrafo successivo, che si riescono a smorzare attraverso la definizione di una apposita campagna di taratura dello strumento.

La campagna di taratura comprende un diverso numero di indagini integrative con lo scopo di costruire una libreria statisticamente significativa in grado di rendere possibile delle interpretazioni e correlazioni efficaci dei dati rilevati. Tecniche integrative che non sono altro che carotaggi e ispezioni videoendoscopiche.

Nel caso in analisi ASPI ha deciso di concentrare il maggiore numero di ispezioni in un numero ristretto di gallerie e precisamente ne ha selezionato 5:

- presso l'Autostrada A12 all'interno delle gallerie della Madonna della Neve, Del fico e S.Anna;
- presso l'Autostrada A16 all'interno della galleria di San Pietro;
- presso l'Autostrada A26 all'interno della galleria Roccadarme;

Per ciascuno degli obbiettivi per cui si è scelto di adottare una tecnologia georadar si hanno diverse tipologie di restituzioni.

Ad esempio l'effettivo spessore del rivestimento lungo tutto lo sviluppo della galleria viene evidenziato grazie alla comparazione con la documentazione storica di contabilità mettendo il luce così possibili presenze di sottospessori. Dalle medesime scansioni è possibile individuare la presenza di centine di pre-rivestimento definendone sia la quantità che la posizione che l'interasse o la presenza di armatura ad intradosso.

2.3 Criticità del GPR

Uno delle criticità che accumuna il GPR e tutte le altre metodologie d'indagine indirette è la necessità di essere tarato con i risultati derivanti da altre indagini simili per comprendere meglio le diverse correlazioni. In particolare il metodo in analisi (GPR) è dotato di un certo grado di non chiarezza circa le anomalie nel caso di materiali con proprietà differenti che si presentano nel radar in modo simile. La capacità di individuare l'ubicazione delle anomalie si scontra con alcune condizioni al contorno.

Un'altra criticità infatti che affligge la tecnica GPR è data dalla tipologia del terreno in cui si conduce l'indagine in termini di presenza di acqua, causa di riflessione e di attenuazione del segnale.

La bassa presenza di conduttività all'interno del calcestruzzo lo rende molto adatto per l'uso del georadar ma simultaneamente il suo tasso aumenta e le condizioni di applicabilità di questo strumento diventano non ottimali in funzione della presenza di acqua. Per questo motivo è utile affiancare il georadar altre tecniche ispettive per ottenere una più completa comprensione delle eventuali problematiche riscontrate dal georadar.

Altre possibili criticità che possono caratterizzare l'utilizzo di questo strumento emergono nel caso di particolari casistiche.

Il georadar non risulta ottimale per la valutazione della resistenza meccanica e sulla natura del materiale nel caso di anomalie relative alla presenza di zone disomogenee che potrebbero essere associate a materiale disgregato o poroso oppure alla presenza di vespai dovuti da un cattivo getto. Questa difficoltà si presenta nel caso di una variazione non netta delle proprietà dielettriche del mezzo.

Per ovviare a questa difficoltà del georadar si ricorre all'uso di prelievi diretti che permettono un'ispezione visiva del materiale disomogeneo e conseguentemente anche ad indicazioni circa le proprietà meccaniche del materiale a seguito di test in laboratorio.

Altra situazione non ottimale si presenta nel caso di lesioni o distacchi dove il georadar seppure in grado di individuare la presenza dell'anomalia non riesce ad indicare l'entità dell'apertura della lesione né di fornire una descrizione della natura dei lembi separati. In questo caso a supporto della tecnica del georadar è indicato l'effettuazione di una videoendoscopia attraverso una mini telecamera ed una scala metrica.

La presenza di vuoti o di cavità risulta anche essa una situazione da attenzionare perché nonostante il georadar permette di individuare l'anomalia non permette la valutazione in termini di dimensione della stessa o di dare informazioni circa la sua natura. Anche in questa situazione si accosta all'ispezione tramite georadar videoendoscopie che permettono di attraversare la anomalia misurando l'entità della sua profondità.

Per tali situazioni critiche si ricorre a campagne di indagine con l'intento di tarare il georadar, campagne analizzate nel paragrafo precedente.

CAPITOLO 3 Definizione delle correlazioni tra parametri e fenomeni: il calcestruzzo di rivestimento

La maggior parte delle gallerie sotto tutela di ASPI è caratterizzata dalla presenza di calcestruzzo di rivestimento. Tra gli anni ’50 e anni ’70 le gallerie costruite erano caratterizzate da un rivestimento in cemento armato. In questi casi si assiste a differenti tipologie di degrado che saranno attenzionate nel paragrafo successivo di questo capitolo dove si andrà a parlare in dettaglio del Catalogo dei difetti redatto da ASPI stessa.

L’analisi dei suddetti difetti e degradi si incastona all’interno del piano di elaborazione di una linea guida per la valutazione delle infrastrutture autostradali Italiane ad opera del gruppo di lavoro creato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) al quale è stato chiamato a partecipare il Politecnico di Torino, come descritto nel primo capitolo.

La partecipazione del Politecnico di Torino avviene all’interno della convezione per svolgere attività di collaborazione nel campo della sicurezza autostradale stipulata con la Società Autostradale per l’Italia che gestisce una parte consistente della rete viaria italiana.

Questa collaborazione si esplica in particolare nell’analisi in laboratorio di innumerevoli carotaggi provenienti dalle varie gallerie soggette a lavori di manutenzione e management.

Il secondo paragrafo di questo capitolo verterà quindi sull’esperienza svolta presso il laboratorio del dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico grazie alla figura del Dott. Oscar Borla, descrivendo il lavoro svolto fino alla conclusione del suddetto lavoro di tesi.

3.1 Catalogo dei difetti redatto da Autostrade per l'Italia

Come introdotto nel primo capitolo, ASPI per quanto riguarda il Manuale delle Ispezioni adotta totalmente le linee guida definite dal CETU mentre per il catalogo dei difetti ne costruisce uno suo. Per cui il Nuovo Catalogo dei Difetti rappresenta il documento integrativo del già descritto Manuele delle Ispezioni.

I vari possibili deterioramenti che possono registrarsi nelle strutture sono catalogati all'interno di questo manuale andando a costituire una vera e propria guida pratica dell' Ispettore.

I vari difetti possibili vengono descritti attraverso appropriate schede identificative in cui si riporta:

- la modalità di manifestarsi del difetto;
- il metodo per poterlo identificare nel caso di non visibilità dello stesso;
- elenco di materiali o elementi che possono essere indagati associabili al difetto preso in considerazione;
- elementi utili all'analisi della diagnosi;
- interpretazioni costruite sulla conoscenza della struttura;
- fattori aggravanti;
- conseguenze e possibile evoluzione;
- pericoli;
- azioni di monitoraggio;
- definizione di possibili misure correttive;
- Osservazioni;
- Informazioni aggiuntive.

I difetti presenti all'interno del Catalogo sono distinti in base agli effetti scatenanti e sono correlati da un codice identificativo. L'interazione con l'acqua, ad esempio, genera difetti come le infiltrazioni d'acqua, concrezioni, effetti del gelo ed efflorescenza su malta o calcestruzzo. Essi sono identificati dal codice alfanumerico HY- n (con n rispettivamente variabile da 1 a 4 a seconda della tipologia di difetti che causa l'infiltrazione).

Nel caso delle infiltrazioni d'acqua devono essere valutate la posizione della stessa, il suo ingresso in pressione o a flusso libero, la misura della portata, la misura della temperatura e possibile misura della conduttività. Assieme a questi vi sono anche altri elementi che possono spiegare la presenza di una possibile infiltrazione quali l'esistenza di discontinuità geologiche, deterioramento del rivestimento o l'ostruzione dei drenaggi.

Nel caso della presenza di concrezioni, generalmente calcaree o di solfati, i parametri che aiutano l'ispettore a identificare questi difetti sono la loro posizione, estensione, superficie, spessore e singola stabilità, assieme ad un campionamento per prove in laboratorio circa la loro effettiva composizione. Anche in questo caso vi sono altri parametri indici di una possibile presenza di queste cause quali l'ingresso di acqua, deterioramento del sostegno se presente e l'ostruzione dei sistemi di drenaggio. In particolare la presenza di concrezioni può risultare molto pericolosa a causa della indebolimento strutturale causato dalla dissoluzione del legante.

Rigonfiamento della carreggiata, espulsione dei giunti mobili e danneggiamento dei canali di scolo sono invece indice della presenza di possibili difetti dovuti all'effetto del gelo. Difetti che posso condurre ad una instabilità localizzata o indebolimento strutturale con conseguente distacco di elementi del rivestimento.

Quando si parla invece di efflorescenza i parametri per la sua valutazione sono la posizione, estensione e possibile esfoliazione. Il filo conduttore che collega i difetti scatenati dall'infiltrazione di acqua è la possibilità di verificarli solo attraverso un'analisi visiva.

Il catalogo tratta anche i deterioramenti dovuti al terreno circostante quali i carsi, cavità naturali le cui dimensioni possono variare da pochi decimetri a diverse decine di metri, e le cavità, scavi non rivestiti di origine antropica, il deterioramento dei portali e l'instabilità dei pendii. In questo caso, questi difetti sono definiti dal codice identificativo ZL-n. Nel caso di carsi o cavità, l'ispezione visiva non è più sufficiente e per questo motivo è indicato l'uso di tecniche topografiche o l'uso del georadar. Generalmente se un rivestimento copre un vuoto può andare contro a sovraccarico, indebolimento e a rottura.

I deterioramenti nelle sezioni vengono invece distinti in tre famiglie: deterioramento nelle sezioni non rivestite, deterioramento in sezioni con rivestimento in muratura o pietra e deterioramento in sezioni con rivestimento in calcestruzzo, rispettivamente identificate con i codici alfanumerici NR-n, RM-n, RB-n dove con n vengono indicate le varie tipologia di deterioramenti. Di questi ultime tipologie di deterioramenti si descrive l'ultima famiglia, i deterioramenti in sezioni con rivestimento in calcestruzzo. In questi i principali problemi che possono presentarsi secondo il Catalogo risultano essere:

- Scheggiatura (n=1);
- Rigonfiamenti (n=2);
- Lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione (n=3);
- Lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature (n=4);
- Deterioramento dello spritz +beton (n=5);

Per scheggiatura s'intende la cicatrice presente nel momento del distacco di un frammento di calcestruzzo del rivestimento dello spigolo. In questo caso risulta essere una problematica che, a meno che non sia stata indebolita la struttura non risulta essere degna di noto da un punto di vista di sicurezza sia dell'utenza che della struttura stessa. Tuttavia, di aspetto molto simile, potrebbero confondersi con la problematica legata alle lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature.

Pericolose per l'utenza e per l'opera strutturale stessa è il rigonfiamento del rivestimento che può causare la caduta di elementi o indebolimento della struttura. L'azione dell'anidride carbonica, solfati o cloruri possono andare ad incentivare la dissoluzione del legante che assieme alla possibile formazione di composti espansivi ed all'azione di congelamento possono dare origine a questo fenomeno controllabile mediante continuo monitoraggio della posizione dell'eventuali fessure nel profilo della galleria e la loro superficie e profondità, consistenza e colore. Questo fenomeno è dovuto alla natura porosa e permeabile del calcestruzzo che quando si è in presenza di un livello di umidità intorno al 60% trovano migliore diffusione gli agenti aggressivi. La caduta di frammenti e la rottura del rivestimento è imputabile anche alle lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione. In questi casi l'ispezione oltre che visiva, ispezione consigliata anche per le precedenti problematiche, è prevista anche l'uso di un'ispezione uditiva mediante battitura con il martello. Quando si verificano fessure sull'intradosso il fenomeno risulta essere visibile in modo sufficiente tramite adeguata illuminazione. Nel caso invece in cui il distacco risulta essere non visibile quindi si ricorre all'uso di un martello che permette l'identificazione della zona affetta dal difetto, tuttavia se la superficie risulta essere affetta da visibili fessure ma il suono del martello risulta sordo bisogna indagare la presenza di zone affette da difetto sulla sezione trasversale in cui agiscono le risultanti di trazione. I parametri da attenzionare in questo caso sono le dimensioni dei distacchi e la larghezza e direzione delle fessure.

Ulteriori deterioramenti presenti all'interno nel Catalogo dei Difetti sono riferiti al deterioramento dello spritz beton. In questo caso il calcestruzzo può essere affetto da:

- Presenza di fessure da ritiro;
- Adesione difettosa con la superficie rocciosa;
- Distacco superficiale del calcestruzzo;
- Spessore insufficiente.

Anche in questo caso i maggiori pericoli per l'utenza risultano essere la caduta di elementi.

Successivamente il catalogo fa riferimento ai difetti presenti sugli elementi strutturali e il deterioramento della geometria della galleria. In questo caso vengono presentate tutte le possibili fessure che si possono registrare identificate dal codice alfanumerico FL:

- Fessure orizzontali.
  Con una direzione parallela all'asse longitudinale della galleria di esse vengono valutate il loro numero, estensione, larghezza, deterioramenti ai bordi e tendenzialmente sono di bassa pericolosità;
- Fessure verticali.
  Molto comuni nelle gallerie dato che possono comparire in qualunque sezione indice come tutte le tipologie successive di fessure d'indebolimento del rivestimento con la generazione di possibili eventi pericolosi;
- Fessure curvilinee.
  Questa tipologia di deterioramento è comune delle gallerie moderne dove il getto del calcestruzzo è caratterizzato da una azione successiva rapida e si identifica tendenzialmente in prossimità del rene del profilo trasversale.
- Fessure da ritiro.
  Di natura molto sottile e di lunghezza proporzionale con il tempo difficilmente supera i 3 mm. La fessura da ritiro tuttavia non è un vero e proprio deterioramento dato che indica la riduzione del volume a seguito dell'essiccazione del calcestruzzo e la presenza di un vincolo che ne ostacola il ritiro.
- Fessure diagonali.
  Con una direzione diagonale rispetto all'asse longitudinale si presenta mai isolata ma in successione di fessure. Il pericolo in questo caso risulta essere l'indebolimento di porzioni di rivestimento compreso tra due fessure consecutive, molto simile ai pericoli derivanti le tipologie precedenti. In genere queste fessure derivano da una deformazione torsionale della galleria.

Tutti questi deterioramenti sono accumunati da una medesima tipologia ispettiva consigliata: ispezione visiva, misurazioni regolari della larghezza della fessura e ispezione uditiva tramite martellamento.

I difetti degli elementi strutturali e della geometria della gallerie comprendono quelli legati a deformazioni identificati con il codice DF-n a seconda se si dovesse trattare:

- di abbassamento in chiave;
- imbozzamento localizzato;
- disassamento dei conci murari;
- deterioramento dell'arco rovescio;
- rottura dell'arco.

In tutti questi casi il Catalogo prescrive ispezioni visive ed uditive e prescrive nel caso di deterioramento non avanzato un semplice riposizionamento per rallentare il suo sviluppo e

stabilizzare la zona deformata. Tuttavia la riparazione spesso comporta la distruzione e la ricostituzione secondo il profilo iniziale.

Parallelamente alle deformazioni si assiste a deterioramenti degli elemento strutturali e della geometria della galleria in relazione alle modalità di realizzazione dell'opera. In questo caso il codice identificativo risulta essere MO-n e vengono presi in considerazione:

- fondi di fori di scoppio instabili;
- vuoti superficiali nel rivestimento;
- vespai;
- deterioramento dei giunti in calcestruzzo;
- difetti superficiali nel calcestruzzo;

Successivamente vengono trattati i deterioramento degli elementi secondari come i difetti della carreggiata stradale o il deterioramento di lastre e tamponature o i possibili deterioramenti associati al fuoco e soprattutto i difetti associati a carenze o addirittura ad assenza di manutenzione. In quest'ultima casistica vengono raggruppati tutti quei difetti che non interessano direttamente la struttura della galleria ma che comunque ne inficiano il corretto funzionamento e che possono causare possibile pericolo per l'utenza. (Centre d'Etudes des Tunnels, 2015; Autostrade per l'Italia, et al., 2020)

3.2 Esperienza di laboratorio e i parametri misurati.

Il Nuovo Catalogo dei difetti redatto da ASPI descritto precedentemente rappresenta una vera e propria guida e promemoria di tutti i possibili difetti di un'opera strutturale come una galleria, correlati dalle rispettive ispezioni suggerite, cause, rischi ed azioni da intraprendere, non menzionate precedentemente ma presenti nel Catalogo. (Autostrade per l'Italia, et al., 2020)

Come accennato nel primo capitolo il MIT, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e ASPI, Società Autostrade per l'Italia S.p.A hanno firmato una convenzione per lo svolgersi di attività nel campo della sicurezza e integrità delle opere d'arte infrastrutturali della rete autostradale con il Politecnico di Torino – Centro interdipartimentale SISCON.

L'ateneo del Politecnico di Torino mette, in quest'ottica, a disposizione i suoi Dipartimenti di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture e di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica.

Presso il Laboratorio MASTRLAB di quest'ultimo dipartimento sono state inviate carotaggi di varie gallerie di competenza di ASPI con l'intento di caratterizzarne il calcestruzzo per potere in questo modo definire, in maniera congrua, le varie azioni di monitoraggio e soprattutto d'intervento là dove necessario. Nel periodo tra Marzo e Dicembre 2020 sono state consegnate un totale di 2519 carote provenienti dalla rete autostradale della regione Liguria e della regione Lombardia.

A tale scopo durante il mese di Luglio 2020 si è assistito all'esecuzione delle prove di laboratorio relative alla prime due campagne svolte sulle carote proveniente dalle suddette gallerie.

Le prove svolte in laboratorio risultano essere:

- Prova per la valutazione della velocità di trasmissione degli ultrasuoni (US)
- Prova di compressione;
- Prova di permeabilità con prova a taglio indiretta;

La prova ad ultrasuoni rientra tra le possibili prove non invasive che possono essere svolte su un provino di calcestruzzo con l'intento di valutarne l'omogeneità del mezzo e quindi poterlo caratterizzare in relazione alla norma di riferimento UNI EN 12504-04-2005: "Prove sul calcestruzzo nelle strutture-Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici". Il principio su cui si basa la suddetta prova è basato sulle onde

ultrasonore, particolari onde meccaniche con una frequenza variabile tra i 4 – 120 kHz. La prova consiste nel posizionamento di due sonde, una emettitrice e una ricevente nelle facce opposte del provino (lettura per "trasparenza"), nel casi in cui il diametro dello stesso non superi i 50 cm di diametro, e sulla determinazione del tempo di volo, tempo impiegato dall'onda sonica per attraversare il materiale.

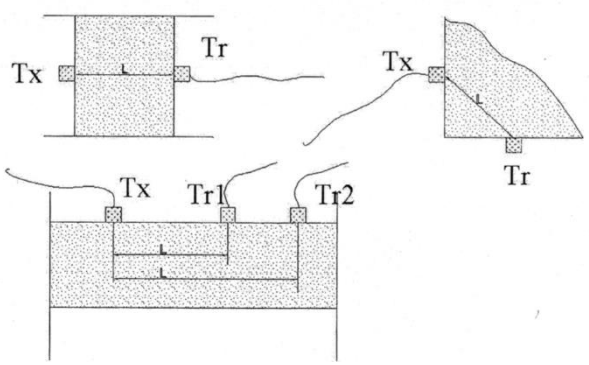

Figura 12: Letture per trasparenza in alto a sx, d'angolo in alto a dx e superficiali in basso.

I test a ultrasuoni sono effettuati attraverso apparecchiatura Proceq TICO caratterizzata da dei trasduttori con una frequenza di 54 kHz collegati all'unità di acquisizione principale attraverso due cavi coassiali mediante dei connettori BNC di 50 cm di lunghezza. Trattandosi di carote cilindriche l'accoppiamento trasduttore superficie è stato ottimizzato con l' utilizzo di uno spessore ausiliario in plastica.

Questa tipologia di prova non produce alcuna tipologia di danno sul campione, è economica e rapida, molto efficace per definire l'omogeneità del materiale. Tuttavia il suo utilizzo per la stima della resistenza non risulta immediato ma è supportato da una vasta e completa letteratura tale da essere riconosciuta e regolamentata da normative in alcuni paesi. Prima di procedere con la prova la strumentazione è stata calibrata seguendo le indicazioni presenti nel manuale tecnico.

In letteratura esistono diverse curve che correlano il valore di velocità dell'onda ultrasonica con il valore di resistenza del materiale, tuttavia tali relazioni non risultano molto affidabili se non correlate ad esempio da ulteriori prove di laboratorio.

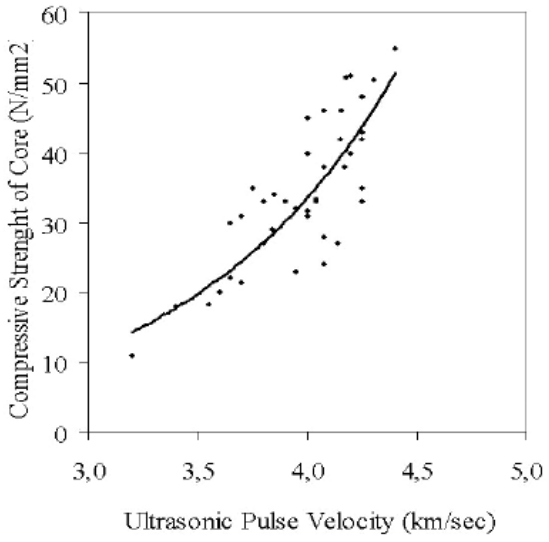

Figura 13:Relazione velocità ultrasonica – resistenza a compressione rilevata su carote (Masi, 2005).

Il concetto alla base della relazione raffigurata nel grafico precedente è la relazione tra la velocità di propagazione delle onde meccaniche espressa in Km/s, le caratteristiche elastiche di un mezzo definiti attraverso i parametri del Modulo elastico dinamico espresso in Mpa, del modulo di Poisson dinamico e la densità di massa del mezzo in Kg:

$$V = \sqrt{\frac{E_D(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}}$$

In questo modo si è messa in evidenza la relazione di diretta proporzionale tra la velocità dell'onda ultrasonica e la radice del modulo elastico dinamico. Tuttavia il calcestruzzo non è un mezzo elastico, isotropo ed omogeneo e per questo motivo bisogna considerare le sue reali proprietà.

Le misurazioni inoltre relative a questa tipologia di prove possono essere inficiate da diversi fattori:

- tipologia di cemento nel caso di calcestruzzi giovani;
- la dimensione degli inerti;
- il rapport di acqua e cemento;

- l’età del conglomerato;
- il contenuto di umidità;
- lo stato di sollecitazione e la presenza di armatura.

In relazione a questi fattori la velocità dell’onda ultrasonica si comporta in diverso modo. La presenza d’inerti di grandi dimensioni determina ad esempio un vistoso aumento della velocità alla quale tuttavia è correlato un valore di resistenza che rimane costante, al contrario invece nel caso di rapporto acqua/cemento ridotto ad un aumento di resistenza considerevole corrisponde una velocità dell’onda costante. Per quanto riguarda il contenuto di umidità, il suo aumento corrisponde ad un aumento si della velocità ma contemporaneamente il carico a rottura diminuisce. (Masi, 2005)

Punto di forza di questa prova è individuare la presenza di difetti interni del calcestruzzo in quanto l’ onda subisce un’attenuazione e ad esse è legata una minore ampiezza del segnale in arrivo. In oltre le variazioni del tempo di volo e quindi della velocità di propagazione dell’ onda fornisce informazioni circa la qualità, eventuale deterioramento e livello di omogeneità del materiale.

L’affidabilità di questo metodo è tale da essere buona se avviene in combinazione con altri metodi d’indagine quali possono essere la prova di permeabilità o di compressione, in modo da ridurre l’influenza dei fattori di disturbo come il grado di umidità e il grado di maturazione. Come diretta indicazione da parte di ASPI si è eseguito e una prova di permeabilità su quei provini che hanno mostrato il maggiore tempo di volo, quello minore e un tempo di volo medio. Su tutti gli altri è stata effettuata una prova di compressione.

La misura delle dimensioni dei provini rettificate è avvenuta attraverso un calibro a corsoio:

- Costruttore: Mitutoyo;
- Matricola: 04356838;
- Precisione: 0,01 mm;
- Ente certificatore: Centro LAT n.051 S.r.l.

La prova di permeabilità o di profondità di penetrazione dell’acqua sotto pressione, regolamentata secondo la UNI EN 12390-8 (2009) consiste nell’ applicare dell’acqua dal basso con una pressione d 500 kPA per 72 ore. Trascorse le quali il provino viene portato a rottura e misurato il grado di profondità di penetrazione dell’acqua. La macchina adoperata è l’attrezzatura della Tecnotest Mod. AT315 che permette l’immissione di acqua in pressione contemporaneamente su tre provini.

Figura 14: Attrezzatura della Tecnotest Mod. AT315 per la prova di permeabilità rispettante la UNI EN 12390-8 presente all'interno del dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino.

Figura 15: Attrezzatura della Galbadin per prova a trazione indiretta detta "Brasiliana" presente all'interno del dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino

Durante questa prova sono stati valutati il peso dopo le 72 ore d'immissione di acqua in pressione, la penetrazione dell'acqua in millimetri e la forza massima che ha distrutto il provino mediante prova di compressione a trazione indiretta.

La prova di compressione monoassiale condotta a controllo di forza con un incremento di carico di $0.2 - 1\ Mpa/s$ ha permesso infine di potere ricavare la forza massima a compressione e ottenere i grafici tensione – deformazione di ogni singolo provino in ottemperanza della UNI EN 12390-3. La prova è stata svolta mediante una pressa servoidraulica statica:

- Costruttore Baldwin- Zwick;
- Capacità di carico 500 kN;
- Modello B-1058 serie MA;
- Numero di serie 502480;
- Ente certificatore Centro LAT n.139-Politecnico di Torino;
- Certificato di taratura n. 155/2019 del 05/09/2019;
- Classe 0.5 secondo la UNI EN ISO 7500-1:2018.

I provini per la prova a compressione mediamente sono caratterizzati dalle seguenti dimensioni medie:

$$diametro = 93 - 96\ mm$$

$$altezza\ del\ provino = 85 - 99\ mm$$

$$area\ sezione = 6700 - 7200\ mm^2$$

I provini invece soggetti alla prova di permeabilità mediamente sono caratterizzati dalle seguenti dimensioni medie:

$$diametro = 93 - 96\ mm$$

$$altezza\ del\ provino = 150 - 210\ mm$$

In conclusione il calcestruzzo attraverso le tre prove può essere pienamente caratterizzato ottenendo i valori di :

- forza massima a compressione;
- tensione massima a compressione;
- massa;
- massa volumica;
- tempo di volo mediante ultrasuoni;

- modulo elastico;
- dimensione massima dell'aggregato;
- tensione massima attraverso prova di trazione brasiliana;
- profondità di infiltrazione dell'acqua.

Le campagne di prove sono tali da impegnare l'intero periodo di elaborazione di questo elaborato impegnando una parte dell'anno 2021, tuttavia dai dati fin ora raccolti si è notato che su medesime gallerie si registrano variazioni, in termini di tensioni di picco, ampie con una variazione anche di 40 Mpa nonostante si fosse registrato per gli specifici provini medesime velocità dell'ultrasuono. Altro dato evidenziato è una diversa resistenza tra i provini facenti parte delle carote provenienti dalla chiave e quelli relativi alle reni di determinate gallerie dove si registra una minore resistenza. Ciò si evince dalla tendenza in cui si dispongono i valori di tensione massima – velocità dell'onda ultrasonica che non rispetta il trend sperimentale che ci si aspetta come si può vedere nella figura 15.

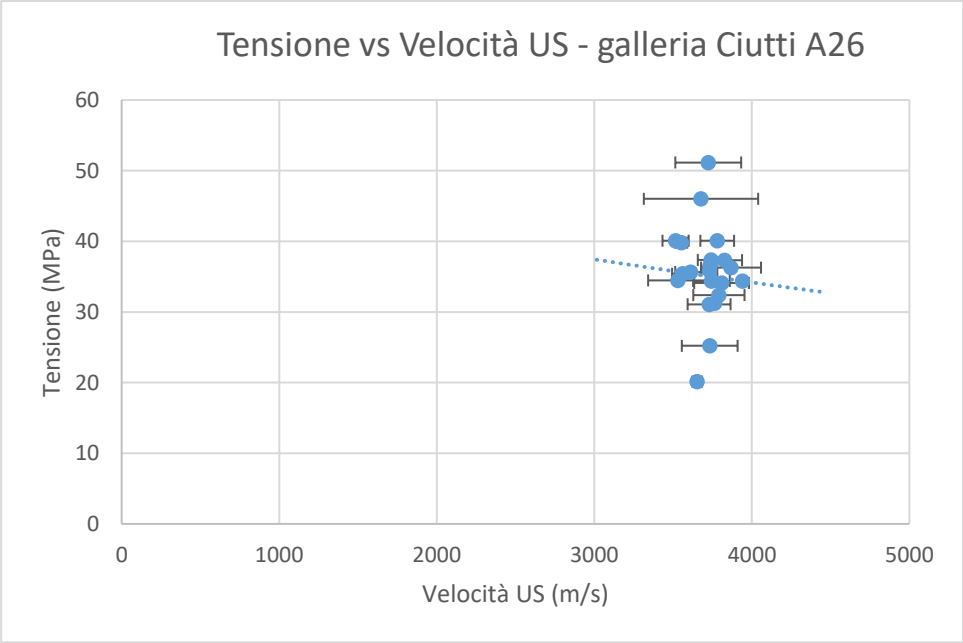

Figura 16: Distribuzione Tensione vs Velocità Ultrasuoni (US) galleria Ciutti A26

In una determinata consegna di campioni inoltre si assiste ad un complessivo aumento della tensione di picco all'aumentare della velocità di trasmissione degli US. Questo comportamento risulta essere più marcato, in particolare, nel caso di carote prelevare in chiave o in sezione destra. Per la sezione sinistra invece per piccole differenze di velocità us, le tensioni di picco sono caratterizzate da variazioni brusche anche di 30 Mpa.

Le cause di tale fenomeno possono essere dovute alle dimensioni degli inerti, età del conglomerato, presenza di armature, ecc…

3.3 Risultati attuali del laboratorio e sviluppi futuri

Per una maggiore chiarezza dei risultati sperimentali e la relativa analisi statica della campagna di misura effettuata sulle suddette carote cilindriche in calcestruzzo prelevate da differenti gallerie della rete autostradale italiana, si riportano due esempi di tabella:

Galleria	**Direzione**	**Massa Volumica media (kg/m^3)**	**Tensione media (MPa)**	**Deviazione Standard sulla Tensione (MPa)**	**Velocità US media (m/s)**	**Deviazione Standard sulla Velocità US (m/s)**	**Dimens. max aggregato (mm)**
Borgonovo	Ventimiglia	2251.89	16.52	5.92	3232.44	326.51	26
Cantalupo	Ventimiglia	2265.41	18.12	7.95	3629.78	329.29	28
Crevari	Ventimiglia	2153.92	12.76	4.10	3368.41	335.66	22
Monte Castelletti	Genova	2271.80	25.69	5.31	3560.01	289.00	33
Pecorile	Ventimiglia	2315.81	20.97	6.57	3710.77	311.78	38

Tabella 1: Parametri fisico/meccanini di provini in cls prelevati da gallerie della rete autostradale italiana.

GALLERIA	ID PROVINO	h0 (mm)	d0 (mm)	PESO (kg)	PRESSIONE ACQUA (kPa)	DURATA PROVA (S)	PESO DOPO PERMEABILITA (Kg)	TENSIONE (trazione indiretta) (Mpa)	PENETRAZIONE ACQUA (mm)	CONDUCIBILITA' IDRAULICA k (m/s)
Olimpino Sud	MOLS400CH	149.55	99.32	2.594	500	259200	2.598	1.95	37	2.11E-12
S.Fermo Nord	SFEN600SX	142.66	99.45	2.656	500	259200	2.66	3.82	31	1.48E-12
Quercino Sud	QUES200CH	157.14	99.5	2.795	500	259200	2.813	2.37	61	5.74E-12
Terrazze Sud	TERS50DX	145.38	99.52	2.625	500	259200	2.623	2.87	17	4.46E-13
Villa Maria Sud	VMAS0SX	149.69	99.68	2.835	500	259200	2.831	5.67	5	3.86E-14

Tabella 2: Prove di permeabilità di provini in cls prelevati da gallerie della rete autostradale italiana.

L'elevato numero di risultati sperimentali a disposizione e la possibilità di averne ulteriori dato l'arrivo di successive campagne di provini presso il laboratorio, rende possibile un futuro sviluppo. L'algoritmo, successivamente descritto nel prossimo capitolo, è in grado di riconoscere la presenza di particolari degradi all'interno del calcestruzzo di rivestimento delle gallerie, visibili all'interno di radargrammi ottenuti da strumentazioni G.P.R. La correlazione tra i risultati di questo algoritmo e i dati delle prove svolte in laboratorio potrebbero consistere nella reciproca conferma di una probabile zona nevralgica.

Un altro possibile sviluppo basato su questi risultati di laboratorio è la realizzazione di un algoritmo di intelligenza artificiale capace di essere addestrato a riconoscere eventuali criticità nel calcestruzzo, in funzione dei vari risultati ottenuti in laboratorio, fornitegli come input.

Si procederà di seguito all'introduzione e alla spiegazione, nel dettaglio, dell'algoritmo individuato come obbiettivo di questo lavoro di tesi.

CAPITOLO 4 L'intelligenza artificiale e l'algoritmo addestrato

Nell'universo dell'ingegneria civile, crolli e situazioni di degrado capaci di rendere una struttura inagibile e soprattutto non sicura sono spesso presenti. Per questo motivo è opportuno associare la valutazione diretta di una sofferenza strutturale alla valutazione locale delle caratteristiche dei materiali e all'ispezione e sperimentazione sugli elementi.

La cosiddetta tradizionale manutenzione correttiva tende ad evolversi verso una *risk-based maintenance* e strategie di manutenzione predittiva. Tuttavia l'applicazione di un metodo del genere nel mondo delle infrastrutture non è proprio immediata. Le ragioni sono molteplici, le scale di misure delle opere, la continua interazione con l'ambiente circostante e il non tenere in considerazione il design for maintenance, in fase di progettazione, sono solo alcune di esse.

Attualmente le indagini ispettive all'interno di opere strutturali come le gallerie, come abbiamo visto molto in dettaglio nel primo e terzo capitolo, sono condotte attraverso osservazioni visive e periodiche. Lo scopo è quello d'individuare presenza di degradi prediligendo tecniche non invasive e non distruttive, onde evitare di provocare effetti negativi sulla struttura stessa. (Montero et al., 2015) Il processo d'ispezione tuttavia risulta essere molto laborioso e non immediato.(Yu et Al.,2007)

Nel condurre queste tipologie d'indagine, le problematiche più comuni sono:

- il costo per l'assunzione e formazione dei dipendenti specializzati per le attività di ispezione;
- tempo operativo nello svolgimento dell'indagine e relative interpretazioni;
- presenza del fattore umano in termini di soggettività degli operatori;
- presenza di possibili zone pericolose per gli operatori stessi.

Questi motivi hanno determinato un forte incremento nella ricerca di monitoraggi automatizzati delle strutture in gallerie. (Balaguer et al., 2014) Tecniche fotogrammetriche, acquisizione artificiale d'immagini e l'utilizzo di algoritmi di machine learning predisposti all'elaborazione d'immagini, sono alcune tra le soluzioni proposte in letteratura e che caratterizzano le attuali ricerche. (Attard Leanne et Al., 2018, Medina et Al., 2017, Makantasis et all.,2015)

Metodologia che da anni è entrata a far parte di molti campi, e anche dell'universo dell'Ingegneria Civile, è l'uso di tecniche di intelligenza artificiale, capaci di venire in aiuto agli ingegneri nel complesso problema di evidenziare, mediante tecniche robuste e non

distruttive, elementi in grado di definire la sofferenza e nevralgie nelle infrastrutture in esercizio.

Ed è qui che si trova il cuore di questo lavoro di tesi. La possibilità di realizzare un algoritmo di machine learning in grado di comprendere e apprendere le relazioni provenienti dai dati sperimentali e rendere di facile analisi il comportamento strutturale dell'opera.

L'uso di approcci automatizzati sono da tempo utilizzati nell'ambito dell'Ingegneria Civile, attualmente la ricerca risiede nella pura robotica e nei settori dell'intelligenza e visione artificiale in cui la competizione risiede nella progettazione dei migliori sistemi che possono eseguire l'ispezione in modo sistematico, veloce e robusto. (Chambon et Al., 2011)

Questo approccio apre le porte per diverse possibili soluzioni di applicazione, tuttavia nel caso specifico, si è voluto accoppiare una tecnica di intelligenza artificiale ad una tecnica di indagine non invasiva come quella del G.P.R. Tecnica che permette un'analisi approfondita di cosa accade all'interno del materiale e in particolari punti facilmente corredabile da ulteriori campagne d'indagine tali da ottenere una maggiore comprensione della struttura. (Protopapadakis et Al., 2015)

Per tal motivo si è addestrato l'algoritmo a riconoscere se un radargramma fornitogli come input, risulti essere da attenzionare o rappresenta una zona "sicura", tuttavia nel corso del capitolo si descriverà in dettaglio questo aspetto.

4.1 L’algoritmo

4.1.1 Intelligenza artificiale

L’ingresso sempre più preponderante dell’intelligenza artificiale nei più svariati campi di applicazione rappresenta la possibilità di utilizzare tecnologie in grado di automatizzare la risoluzione di problemi e attività tipiche della mente umana e soprattutto dell’abilità del professionista. Il punto di forza è la velocità e la capacità di gestione automatizzata di grandi quantità di dati.

Questo nuovo approccio è guidato da due tecniche di apprendimento automatizzato, il Machine Learning e il Deep Learning. Esse sono in grado di permettere la risoluzione di problemi direttamente dai dati sperimentali.

Il Machine Learning è quel campo della ricerca che si occupa della realizzazione di sistemi e algoritmi in grado di apprendere in modo automatico dai dati, usati come input, creando una vera e propria conoscenza che possiede un livello di accuratezza prossimo a quello desiderato. Il Deep Learning, invece, è un sottoinsieme del Machine Learning, più evoluto, che ha come scopo l’imitazione delle attività e metodi di apprendimento del cervello umano sfruttando diversi livelli di astrazione.

Man a mano che le informazioni estratte dall’algoritmo diventano più complesse, aumenta la profondità di questi livelli.

Questa branca del Machine Learning si basa sull’ideazione di architetture di reti neurali artificiali. Esse non sono altro che modelli matematici realizzati ad immagine e somiglianza di rete neurali biologiche vere e proprie. Le unità base sono i neuroni artificiali caratterizzati da diversi input ed un solo output definito come somma pesata dei valori d’input. In letteratura esistono diverse tipologie di reti neurali artificiali tra cui le Multi Layer Perceptron (MLP) e le Convolutional Neural Network (CNN).

I metodi per l’apprendimento di una rete neurale possono essere di 4 tipologie:

- Addestramento supervisionato (Supervised Learning): a tutti i dati presenti nei dati di allenamento o training set (xi) è associato un valore di risposta (yi) (James et Al., 2014);
- Addestramento non supervisionato (Unsupervised Learning): A nessuna osservazione contenuta nel dataset di allenamento è associata alcuna risposta;
- Addestramento Semi-supervisionato (Semi-Supervised Learning): ibrido tra le due metodologie di allenamento precedenti;

- Addestramento rinforzato (Reinforcement Learning): in questo caso si assegna un "premio" o "penalità" al modello se in fase di allenamento avrà preso la risposta corretta o meno;

Tra i più svariati problemi nei quali le reti neurali artificiali vengono in aiuto, uno dei più famosi è la classificazione delle immagini, ed è proprio questo l'ambito in cui si articola l'algoritmo proposto. Per il riconoscimento delle immagini vengono utilizzate le reti neurali convoluzionali (CNN) che si basano sull'operazione matematica della convoluzione, particolare operazione lineare. Queste tipologie di reti sono caratterizzate da vari livelli di layer alternati tra loro che si presentano a cascata:

- Input layer: livello preposto a ricevere l'immagine e al ridimensionamento;
- Convolutional layer: livello con lo scopo di estrarre le caratteristiche significative delle immagini (*features*);
- Rectified Linear Unit Layer (ReLu): livelli aggiuntivi presenti subito dopo la convoluzione che svolgono operazioni che avvengono pixel per pixel. In questo punto viene introdotta la non linearità nella rete;
- Pooling layer: livelli adibiti allo svolgimento dei sotto-campionamenti e nel ridurre progressivamente la dimensione spaziale degli input in modo da diminuire il numero di parametri e il carico computazionale;(Barraco, 2019)
- Fully connected layer: livello posto al termine della rete con lo scopo di prendere le immagini analizzate e tradurle in categorie.

4.1.2 Resnet50

Per questo lavoro di tesi è stata addestrata una rete convoluzionale (CNN) quale RESNET50 utilizzando l'ambiente di programmazione MATLAB2020b.

RESNET è una rete neurale convoluzionale ideata nel 2015 da Kaiming He et al., nata da un'osservazione rivoluzionaria nell'ambito del machine learning: "aumentando la profondità dei livelli della rete c'è il rischio di peggiorare la rete". Le reti neurali più profonde intuitivamente dovrebbero essere più performanti di quelle meno profonde, o quanto meno, dovrebbero mostrare risultati migliori in fase di allenamento in quanto, in tale fase, non è possibile l'esistenza del fenomeno dell'*overfitting*. Tuttavia, lo Stato dell'Arte mostra come al crescere della profondità della rete l'aumento dell'accuratezza non è sempre verificato. Questo fenomeno prende il nome di *degradation problem,*. (He et Al., 2016; He at Al-, 2015; He at Al., 2014).

In tale ottica, l'elemento innovativo che rende RESNET maggiormente performante rispetto ai suoi simili è il possesso di un'unità residuale (*skip connection*) che lo rende capace di apprendere principalmente le differenze tra i layer in ingresso e in uscita. L'idea degli sviluppatori è che le connessioni dirette tra i vari livelli fossero difficili da allenare e che fosse possibile apprendere la differenza tra i due livelli, ovvero il residuale, e successivamente aggiustare il risultato attraverso questo valore. In tal modo è possibile mitigare le problematiche provenienti da eccessive profondità.

La tipologia di RESNET usata per il lavoro di tesi è RESNET50. In letteratura esistono diverse versioni che differiscono per il numero presentato come suffisso rappresentante la somma tra i numero di layer convoluzionali *fully connected* caratterizzanti la rete: 34-50-101-152 .

RESNET50 è caratterizzata da 177 layer di cui 49 layer convoluzionali e 1 *layer fully* connected; viene definita come una rete neurale "*feed forward*" con "*residual/skip connections*". La rete conta 23 milioni di parametri (23587712), dei quali 23534592 nella fase di allenamento e i restanti nella fase di test.

L'avvento di RESNET ha permesso lo sviluppo di ulteriori reti più profonde basate sull' idea delle unità residuali andando ad arricchire l'ampio Stato dell'Arte di queste reti.

Il motivo della scelta di utilizzare questa tipologia di algoritmo risiede nel fatto che la rete convoluzionale supervisionata RESNET mostra una notevole profondità e contemporaneamente è caratterizzata da un tempo e da una complessità computazionale nettamente minore (Ventura,2020) rispetto ad altri algoritmi, mostrando meno errori sulla classificazione delle immagini rispetto a reti di diverso genere che hanno meno layer, ottenendo in casi particolari un miglioramento anche del 28% (Lin et Al, 2014; Simonyan et Al., 2014).

L' architettura di RESNET è costituita come mostrato nella figura sottostante da quattro fasi. Ogni fase è costituita dal susseguirsi di operazioni di convoluzione differenziati dal numero di filtri adoperato che possono essere 64, 128, 256 e 512. All'inizio e alla fine di queste fasi sono presenti due strati definiti di *pooling* con lo scopo di ridurre le dimensioni dei tensori e velocizzare l'utilizzo della rete (Gatto, 2017).

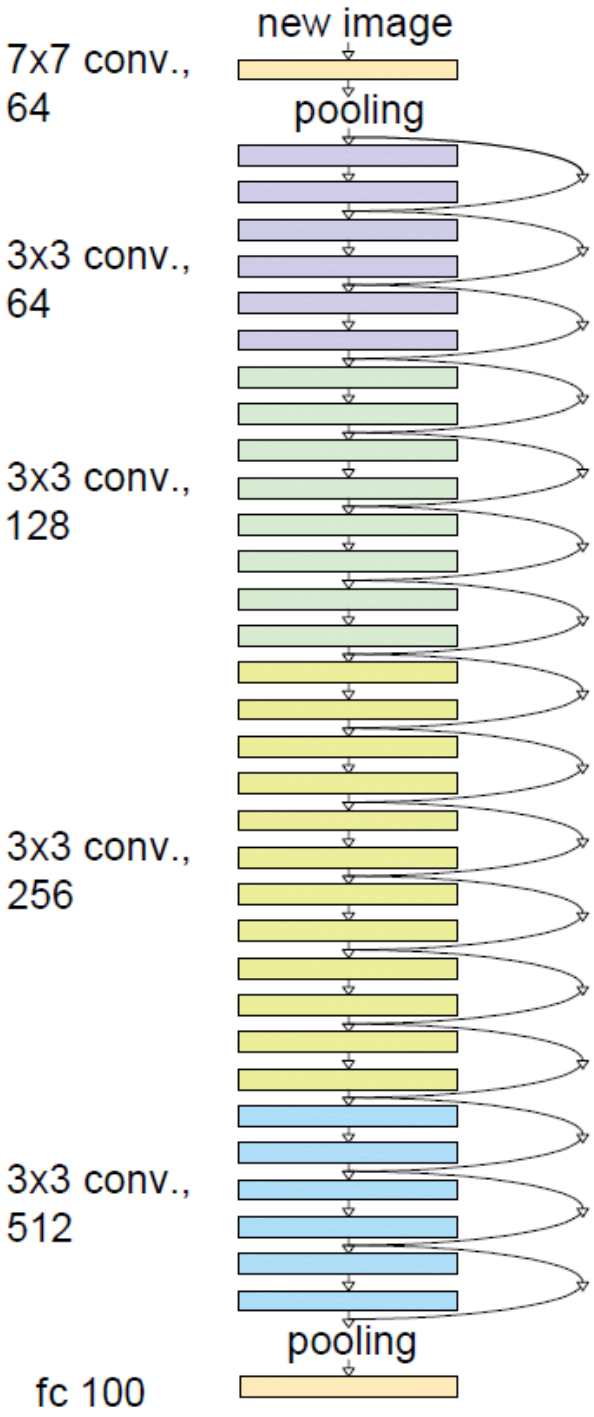

Figura 17: architettura di RESNET, nel caso con 34 layer. (He et Al., 2015)

4.2 Pre-processing delle immagini e creazione del database

Prima di presentare la classificazione che svolge l'algoritmo è necessario descrivere la fase di pre-processing delle immagini fornite come input.

Le immagini di partenza sono i radargrammi, ovvero i profili G.P.R acquisiti mediante la visualizzazione di tipo B-scan, data dall'insieme delle tracce radar campionate lungo il profilo di acquisizione. Essa non è altro che una rappresentazione bidimensionale delle riflessioni esistenti all'interno del mezzo indagato sottoposto all'indagine mediante georadar. L'asse orizzontale rappresenta la lunghezza del profilo acquisito, mentre l'asse verticale rappresenta la profondità d'indagine. Si è scelto di lavorare con i radargrammi per vari motivi. Tra essi vi è la possibilità di non dovere trattare la presenza di forti esposizione di luci ed ombre e, soprattutto, perché il G.P.R è diventato uno dei metodi preferiti per il rilevamento dei difetti nel calcestruzzo di rivestimento delle gallerie.
Questo è dovuto alla sua forte capacità di penetrazione, facilità, comodità di utilizzo e trasporto (Davis et Al.,2005).
I G.P.R sono stati utilizzati in un ampio spettro di applicazioni tra cui la localizzazione di vuoti nel calcestruzzo (Trela et Al., 2015), il tracciamento dei servizi sotterranei (Jaw et Al., 2011), l' ottimizzazione e la valutazione del ballast ferroviario (Shao et Al., 2011) e il rilevamento di mine terrestri (Torrione, 2014).

I radargrammi, tuttavia, se considerati direttamente dopo l'acquisizione, sono caratterizzati dalla presenza di "disturbo", "code sonore" o "interferenze", che ,assieme a una non corretta scala orizzontale e verticale, rendono impossibile un'immediata interpretazione.

I radargrammi, per essere interpretati, devono essere trattati attraverso l'uso di filtri:

- Move start time: filtro capace di rimuovere la porzione di segnale tra aria e mezzo investigato;
- Background removal: filtro capace di rimuovere quelle componenti continue lungo la direzione orizzontale del radargramma;
- Vertical bandpass filter: filtro capace di attenuare certe frequenze limitatamente a delle finestre scelte;
- Smoothed gain: filtro per livellare ad una stessa quantità la potenza lungo il rilievo del radargramma.

Questo è stato svolto direttamente dalle ditte di competenza a cui Autostrade per l'Itala ha commissionato i rilievi mediante georadar: RINA, SOCOTEC, MTSE, AKRON. In

particolare, per l'addestramento dell'algoritmo si sono adoperati solo i radargrammi filtrati realizzati dalla società RINA.

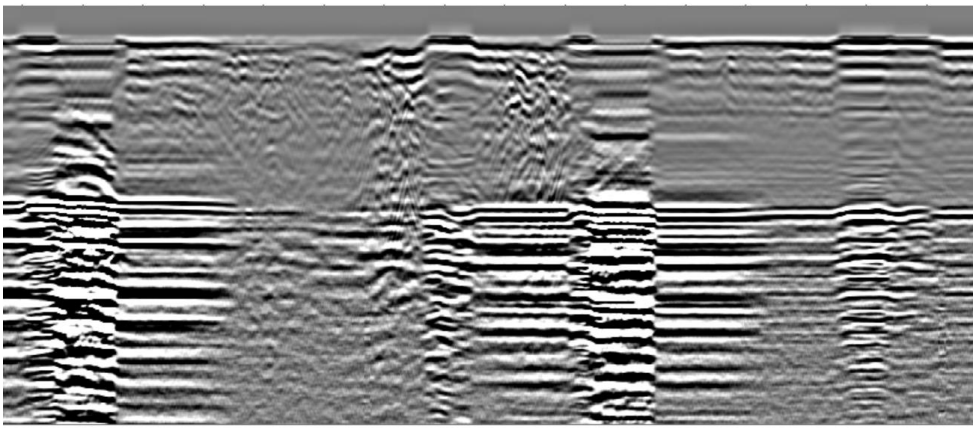

Figura 18: esempio di radargramma filtrato

Ogni galleria è provvista di 3 a più radargrammi in funzione della sua estensione e dal numero di corsie (fig.8 capitolo 2.2). Ciascuno radargramma è stato diviso in elementi di dimensioni variabili in media tra i 150 - 254 pixel orizzontali e i 300 - 450 pixel verticali.

Questa operazione è stata condotta utilizzando il sito web pinetools.com/split-image.

Una volta ottenuti i diversi dati d'input, si è proceduto alla creazione di un database. Si è creata una cartella denominata "Image Classification" contente una sotto cartella "Data". All'interno di quest'ultima sono state catalogate le diverse classi (Krizhewsky et all., 2017)

L'associazione tra l'immagine i-esima e la sua classe è avvenuta confrontando i radargrammi filtrati privi di interpretazioni con le relazioni realizzate dalle società competenti, contenenti i radargrammi corredati dalle interpretazioni (figura 10 capitolo 2.2)

Le classi del database sono state suddivise nel modo seguente:

- HEALTHY : elementi privi di alcun difetto individuato tramite il G.P.R;
- DAMAGED: elementi contenenti vuoti, anomalie nello spessore del rivestimento, fratture, discontinuità lineari;
- ANOMALIE: elementi contenenti anomalie nello spessore del rivestimento (fenomeni di diffrazione). Queste anomalie sono dei degradi dovuti all'invecchiamento del calcestruzzo e all'effetto di sbalzi termini. Piccole crepe, vespai, lesioni ridotte e deterioramento del calcestruzzo caratterizzano questa classe.

- MIX VUOTI : elementi caratterizzati da assenza di materiale. Tra essi sono presenti si elementi dove non è stata svolta nessuna seconda indagine per caratterizzare meglio la natura del vuoto, sia elementi ulteriormente indagati e interpretati come scavernamento o distacco di calcestruzzo.
- DISTACCO DI CALCESTRUZZO: immagini in cui si evince soltanto distacco di calcestruzzo.
- SCAVERNAMENTO: elementi in cui si registra la presenza di vuoti estesi tra il calcestruzzo di rivestimento e la parete rocciosa, o tra il calcestruzzo stesso.
- VUOTI "SEMPLICI";
- CLASSE C2: classe contenente le immagini di scavernamento e distacco di calcestruzzo.

Una volta realizzato il database con la varie classi, per ognuna di esse, all'interno dell'algoritmo, sono state definite le dimensioni dei dataset. Il dataset è un insieme d'immagini utilizzati per testare ed allenare RESNET50.

Le tipologie di dataset sono due: Training-set e Test-set. Come vedremo nel prossimo paragrafo, durante ogni addestramento dell'algoritmo, la percentuale del training varierà dal 30% al 75% e con essa l'accuratezza.

Un approccio che permette un miglioramento nelle prestazioni di un algoritmo d'intelligenza artificiale è il "data augmentation". Durante la fase d'inizializzazione del pretraining, vari studi hanno dimostrato come l'uso di vari protocolli atti all'aumento del set di dati generasse un miglioramento dell'accuratezza degli algoritmi (Jo et Al.,2017; Reichman et Al., 2017; Ding et Al., 2017).

Le tecniche di data augmentation più comuni sono:

- Horizontal shift augmentation: spostamento dei pixel di un'immagine in direzione orizzontale;
- Vertical shift augmentation: spostamento dei pixel di un'immagine in direzione verticale;
- Horizontal flip augmentation: rotazione delle immagini rispetto l'asse verticale;
- Vertical flip augmentation: rotazione delle immagini rispetto l'asse orizzontale;
- Random rotation augmentation: rotazione delle immagini in modo casuale di un angolo compreso tra 0 e 360 gradi;
- Random brightness augmentation: variazione causale della luminosità dell'immagine;
- Random zoom augmentation: aumento tramite zoom dell'immagine in modo casuale;

Ai nostri fini si è adoperato soltanto l'Horizontal flip augmentation (Zhong et Al., 2020; Hussain et Al., 2017) adoperando il programma di Microsoft: Microsoft Office Picture Manager.

4.3 Deep Learning nelle gallerie e Classificazione del danno multilivello

Si ritiene che un approccio multilivello possa essere una metodologia d'indagine efficace per le ispezioni in galleria. L'approccio proposto mira ad associare un livello di attenzione sempre maggiore nel caso si dovessero rilevare criticità tali da dovere essere approfondite maggiormente a livello strutturale.

Prima di illustrare l'approccio proposto è necessario citare gli studi che durante gli ultimi decenni hanno introdotto le tecniche innovative e all'avanguardia del deep learning e del machine learning nel vasto mondo delle gallerie.

Come è stato detto all'inizio di quest'ultimo capitolo, la diagnosi dei danni strutturali del rivestimento di una galleria è fondamentale per operare in termini di sicurezza all'interno dell'opera. Le tipologie di danno ai rivestimenti delle gallerie più importanti sono quelli che comportano crepe e fessure e quindi possono ridurre la resistenze della struttura nel suo complesso.

Inizialmente, prima d'introdurre le tecniche del machine learning, per il rilevamento dei danni superficiali si utilizzavano tecniche d'ispezione automatica basate sull'acquisizione delle immagini da parte di telecamere con la difficoltà di non essere performanti per il riconoscimento con precisione e distinzione delle varie tipologie di danno. (Mohan et Al., 2018; Yu et Al., 2007)

Per ovviare a questa mancanza la letteratura offre vari metodi basati sulla visione artificiale per l'automazione del processo d'identificazione dei difetti, dai metodi come il *Gabor Filter Invariant to Rotation* (Medina et Al., 2017) alla binarizzazione a blocchi (Qi et Al.,2018).

Con lo scopo di migliorare l'adattabilità dei modelli, si è introdotto l'apprendimento automatico per il rilevamento dei danni strutturali attraverso le *Support Vector Machines* (SVM) e le Reti neurali artificiali (Liu et Al.,2002; Qu et Al., 2010; Moon et AL., 2007). Un importante esempio di applicazione delle SVM vede il loro utilizzo accoppiato ad un algoritmo genetico con lo scopo di rilevare la presenza di oggetti interrati e stimare la loro posizione e tipologia di materiale utilizzando immagini G.P.R. (Pasolli et Al.,2008).

Il Machine Learning attraverso le Support Vector Machines ha trovato impiego anche nell'identificazione dei vuoti all'interno del cemento armato sfruttando, anche in questo caso, i radargrammi G.P.R (Xie et Al., 2013) con la differenza, rispetto allo studio proposto in

questo lavoro di tesi, che l'algoritmo addestrato sfruttava radargrammi sintetici non filtrati. (Szymczyk et Al., 2015)

Tuttavia, negli ultimi anni, le metodologie che hanno suscitato maggiore attenzioni sono state quelle che appartengono alla famiglia del deep learning, gruppo a cui fanno parte, come abbiamo visto, le reti neurali convoluzionali (CNN).

Questi approcci hanno mostrato di possedere forti capacità nell'apprendimento di caratteristiche profonde raggiungendo prestazioni elevate soprattutto nei campi della classificazione delle immagini (Protopapadakis et Al., 2015), nell'individuazione di oggetti interrati. (Al-Nuaimy et Al., 2000), nell'individuazione di crepe nel calcestruzzo (Abdel-Qader et Al., 2003; Nishikawa et AL.,2012), e vari aspetti riguardanti l'ispezione e la manutenzione delle infrastrutture civili (Sohn et AL., 2005; Victores et Al., 2011; Huang et Al., 2018).

Un esempio di classificazione mediante l'uso di una rete CNN è stata proposta da Yang et al. La rete è in grado di individuare, tramite radargrammi G.P.R, la presenza di difetti con assenza o meno di infiltrazione.(Yang et Al., 2020).

Altri esempi vedono l'applicazione di reti neurali per la ricerca e identificazione di ferri all'interno della matrice di calcestruzzo attraverso radargrammi G.P.R., identificabili attraverso la presenza di iperboli. (Xiang et Al., 2013; Chen et Al., 2019; Asadi et Al, 2019; Qiao et Al, 2015)

Dai vari lavori trovati in letteratura si possono riassumere di seguito gli aspetti rispetto ai quali l'algoritmo RESNET50, proposto e addestrato in questo lavoro di tesi, si differenzia:

- Utilizzo di radargrammi filtrati;
- Utilizzo di radargrammi non sintetici ma provenienti da reali campagne di ispezioni ad opera di Autostrade per l'Italia;
- Rete CNN scelta;
- Classificazione multilivello adottata.

Si mostra di seguito, in cosa consiste nel dettaglio la classificazione proposta. La classificazione multilivello adottata si sviluppa in quattro step:

- Livello1: Il primo livello consiste nella classificazione tra le classi HEALTHY e DAMAGED. Il nuovo radargramma fornito all'algoritmo viene collocato nella prima

classe se non presenta alcun difetto. In caso contrario, viene classificato come corrispondente ad una condizione danneggiata;

- Livello 2: Una volta che l'immagine viene classificata come elemento contenete difetti, l'algoritmo procede con un' ulteriore classificazione collocandola nella classe anomalie o MIX VUOTI;
- Livello 3: Nel caso in cui dovesse essere stata classificata come MIX VUOTI, La procedura si ripete compiendo un'ulteriore classificazione in VUOTI "semplici" e CLASSE C2;
- Livello 4: L'ultima classificazione identifica il radargramma, definito precedentemente come appartenente alla CLASSE C2, come contente o distacco di calcestruzzo o scavernamento.

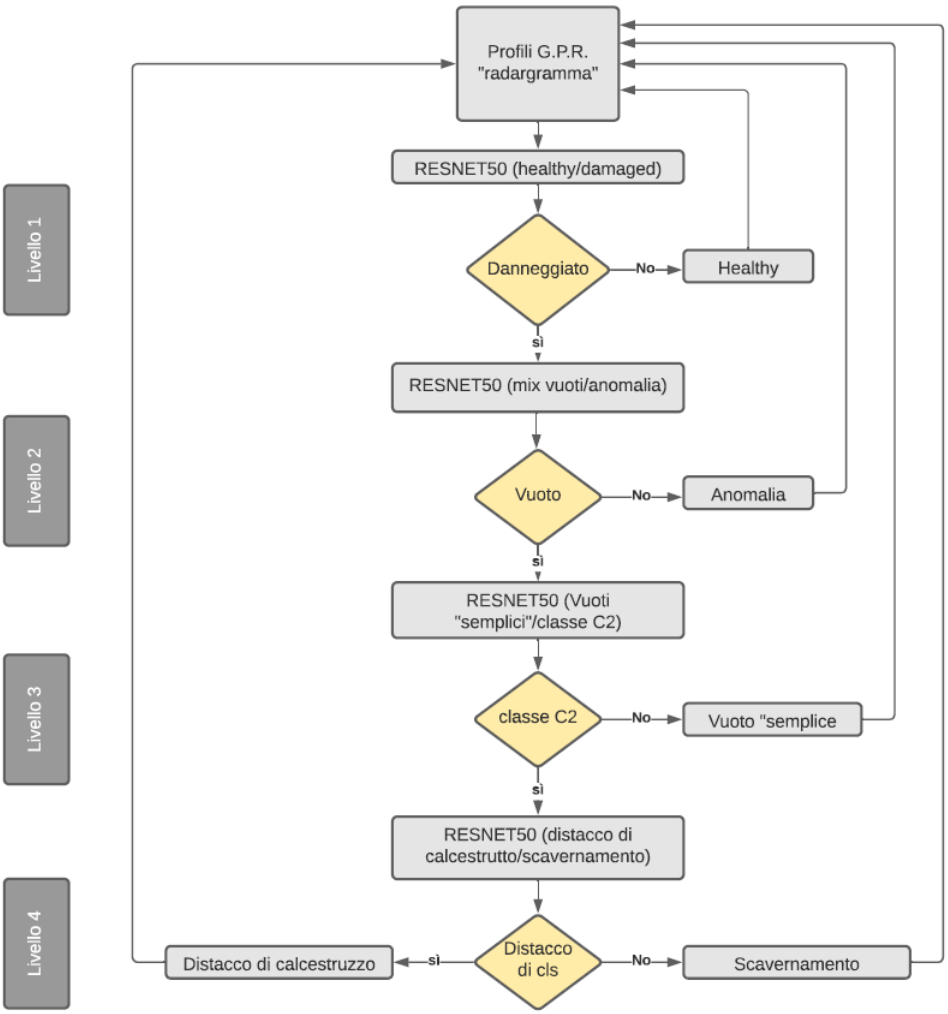

Figura 19: Flowchart della classificazione multi-livello del danno

4.4 Risultati e discussioni

Di seguito si riportano i risultati ottenuti testando l'algoritmo. I dataset sono stati suddivisi in training-set e test-set attraverso percentuali variabili seguendo step discreti. La variazione dell'accuratezza dell'algoritmo, in funzione di tali percentuali, è stata opportunamente evidenziata.

Quando si trattano algoritmi di classificazione è fondamentale introdurre la matrice di confusione. Questo strumento permette di comprendere l'efficienza della classificazione. Essa ha una forma tabellare e contiene sia le informazioni relative ai dati che effettivamente appartengono ad una determinata classe, sia le informazioni relative ai dati predetti dall'algoritmo. Per una migliore efficienza e, soprattutto, velocità computazionale si è deciso di lavorare in modo concatenato sfruttando sempre una classificazione a due classi, come mostrato nel flowchart in figura 18.

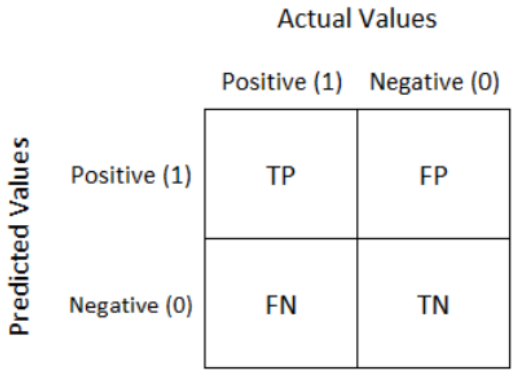

Figura 20: Schema di matrice di confusione a 2 classi

Le alternative che offre la matrice di confusione sono di 4 tipologie:

- Vero positivo, "*true positive* TP": classificazione corretta.
- Vero negativo, "*true negative* TN": classificazione corretta.
- Falso positivo, "*false posivite* FP": classificazione non corretta. Nel caso considerassimo il livello 1 di classificazione, si assiste a questo errore quando un'immagine è definita danneggiata ma in realtà non presenta difetti. Questo errore prende il nome di errore di tipo 1;

- Falso negativo, "*false negative* FN": classificazione non corretta. In questo caso considerando lo stesso esempio, si assiste all' errore di tipo 2 quando si classifica un'immagine come priva di difetto ma in realtà il difetto è presente.

La matrice di confusione possiede una sua metrica che permette di dare un giudizio al classificatore. Ai fini di questo lavoro di tesi sono stati utilizzati il tasso di errore e l'accuratezza.

Il tasso di errore (ERR) si definisce come la somma degli errori diviso il numero totale dei casi ed è un numero compreso tra 0 ed 1:

$$ERR = \frac{FP + FN}{TN + FP + TP + FN}$$

L'accuratezza (ACC) si definisce come la somma delle classificazioni corrette diviso il numero totale dei casi ed è un valore compreso tra 0 e 1:

$$ACC = \frac{TP + TN}{TN + FP + TP + FN}$$

Si noti che entrambe le grandezze sono ottenibili l'una dall'altra:

$$ERR = 1 - ACC$$

$$ACC = 1 - ERR$$

Dall'analisi dei risultati è stato osservato un comportamento che in letteratura prende il nome di "*Deep Double Descent",* introdotto per la prima volta da Belkin et Al.(2019)

Vari modelli, come RESNET e reti CNN standard, basati sull' addestramento profondo tipico dell'intelligenza artificiale, mostrano tale fenomeno per un' ampia varietà di attività diverse, tra cui la classificazione delle immagini.

Le prestazioni dei modelli prima peggiorano e poi migliorano in funzione di tre caratteristiche:

- Dalla complessità del modello, definita in base al numero di filtri contenuti nei layer convoluzionali (*model- wise Double Descent);*
- Dal tempo di addestramento (*Epoch- wise Double Descent);*
- Dal numero di elementi usati per l'addestramento (*Sample- wise Double Descent)*

Nello studio di Nakkiran et Al. (2019) il comportamento del *deep double descent* è governato dal valore dell' Effettiva Complessità del Modello, definito come il numero massimo di campioni tali da ottenere un errore, nella fase di addestramento, prossimo allo zero.

Il *deep double descent* è il fenomeno, quindi, per cui le prestazioni migliorano, poi peggiorano quando il modello inizia a sovradimensionars,i e infine migliorano maggiormente con l'aumentare delle dimensioni stesse del modello, dalle dimensioni dei dati o dal tempo di addestramento. Il picco, secondo lo studio citato precedentemente, avviene in prossimità del valore di Effettiva Complessità del Modello. (Nakkiran at Al., 2019)

Nei risultati discussi nei prossimi sottoparagrafi si parlerà del *sample-wise Double Descent.*

4.4.1 Livello 1: Healthy/Damaged

Il primo livello della classificazione consiste nella capacità di riconoscere se l'elemento del radargramma dato come input all'algoritmo rappresenta una zona "sana", priva di difetti, o danneggiata.

Nella fase di scrittura dell'algoritmo si è prestata attenzione a considerare un quantitativo omogeneo di immagini nelle due classi. Le classi sono sempre state considerate contenti lo stesso numero di elementi pari al numero corrispondente alla classe con minori elementi.

Questo è stato fatto per non ricorrere a metodologie particolari per risolvere problemi di squilibrio tra le classi. (Longagde et Al., 2013)

Il problema dello sbilanciamento tra le classi di un database può avere una duplice origine: o è una situazione intrinseca del dataset adoperato o può essere causato da forze esterne. Il caso in cui problema è intrinseco accade quando l'evento meno raro risulta essere la "controparte" dell'evento raro, come accade nel nostro livello 1. L'evento di sbilanciamento risulta essere invece legato a cause esterne quando l'ottenimento di nuovi elementi della classe rara diventa essere oneroso in termini, ad esempio, economici o di tempo. (He e Garcia, 2009; Dossi, 2018).

Nel livello 1 la classe *HEALTHY* contiene 2925 immagini, mentre la classe *DAMAGED* contiene 2830 immagini. Dato l'elevato numero di radargrammi l'operazione di *Horizontal Flip Augmentation* non è stata effettuata per la classe Healthy.

Nella figura 20 è stato riportato l' andamento dell'accuratezza dell'algoritmo in funzione della cardinalità delle classi e in funzione della percentuale del dataset usata in fase di allenamento.

Il valore di accuratezza è stato ottenuto come media aritmetica su 5 iterazioni dell'algoritmo per ogni combinazione di numero di elementi per classe e percentuale di allenamento.

La percentuale di allenamento varia dal 30% al 75% del dataset, la controparte è stata utilizzata come test-set. Il numero di elementi per classe varia da 167 a 2830 seguendo la seguente discretizzazione 167, 300, 500, 723, 900, 1100, 1400, 1800, 2200, 2400, 2500, 2830.

Come si nota in figura 20, il valore di accuratezza maggiore è stato registrato per un valore di cardinalità per classe pari a 500 elementi con una percentuale di allenamento pari a 70%.

Questo lo si vede con maggiore chiarezza nella rispettiva matrice di confusione:

MATRICE DI CONFUSIONE		
n°cardinalità = 500	HEALTHY REAL	DAMAGED REAL
HEALTHY PREDICTED	0,927	0,073
DAMAGED PREDICTED	0,0933	0,9068

Tabella 3: Matrice di confusione LIVELLO 1 , 500 elementi per classe e 70% di training-set

Si riporta in figura 22 il corrispettivo del grafico dell'accuratezza, il grafico dell'errore sempre in funzione del numero di cardinalilità e la percentuale di allenamento del training-set.

La rete RESNET50 ha quindi mostrato un'accuratezza del 91% in questo primo step di classificazione.

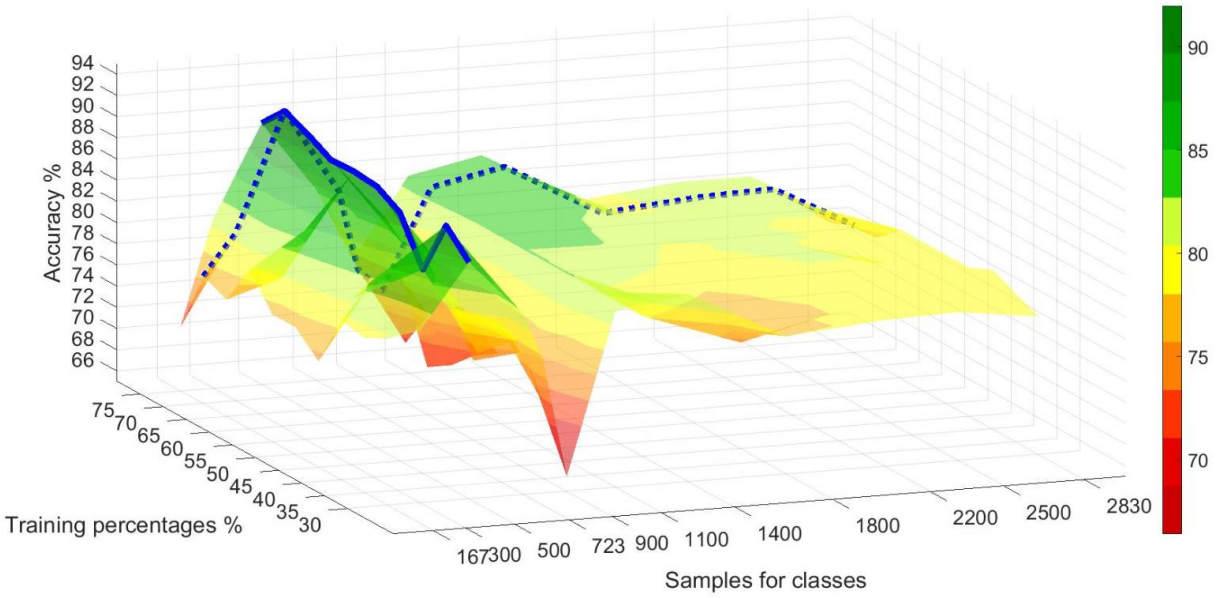

Figura 21: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 1

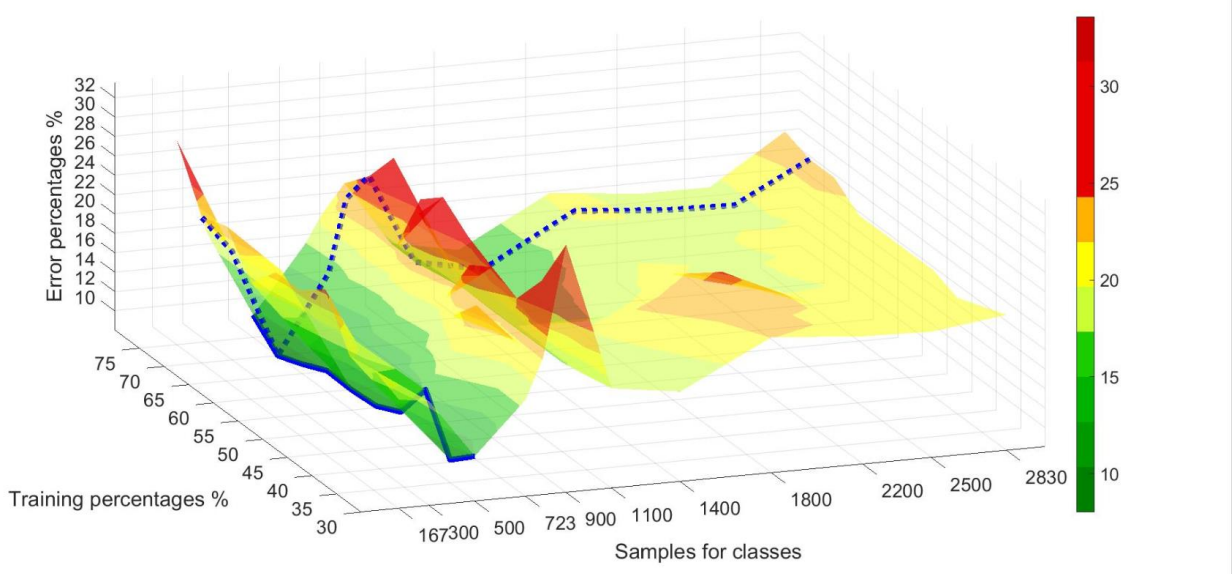

Figura 22: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 1

In questo primo livello, dai dati ottenuti, si coglie il fenomeno del *Sample-Wise Double Descent.* L'andamento della linea blu tratteggiata, corrispondente alla percentuale di

addestramento pari a 70%, mostra la variazione dell'errore nel test variando il numero di elementi per classe, mettendo in luce il fenomeno. Da questo primo studio si evince la prima discesa e la presenza del picco di risalita in prossimità di un numero di elementi pari a 900 per classe. La seconda discesa tuttavia rimane non prettamente definita, dato il comportamento inaspettato nella coda. Tuttavia, si può ipotizzare che la finestra compresa tra 900 e 2830 rappresenti una zona verosimilmente di inizio "post-picco". Per un maggiore numero di elementi ci si aspetta che la curva andrà a tendere verso valori di errore minore. Per tale motivo occorrerebbero maggiori dati per cogliere l'effettivo miglioramento dell'errore.

In un secondo studio si approfondirà l'accuratezza dei risultati, ottenendo un andamento maggiormente indicativo e si aumenteranno il numero di campioni , in modo tale da ottenere un errore minore dell' 8% ottenuto in questo studio preliminare.

Nello stesso grafico di figura 21, la linea continua blu evidenza il comportamento del *double descent* mostrando la prima discesa seguita dalla risalita corrispondente ad un errore pari al 15% per poi ridursi verso un minimo pari all'8%.

In un secondo studio si approfondirà il motivo della presenza di una piccola risalita dell'errore fino al 10.34% in prossimità della coda indagando maggiormente l'incertezza statistica relativa ai valori di accuratezza.

4.4.2 Livello2: Anomalia/Mix Vuoti

Il livello 2 consiste nella riclassificazione dell'immagine, classificata precedentemente come "DAMAGED", come appartenente alla classe "ANOMALIA" o "MIX VUOTI".

In questo caso la cardinalità delle due classi rispettivamente è pari a 960 per la classe "ANOMALIA" e 2550 per la classe "MIX VUOTI".

L'accuratezza e l'errore sono stati rappresentati al variare della numero di elementi per singola classe e al variare della percentuale di allenamento del training-set. (figura 23 e 24)

Il numero di elementi per classe è stato considerato pari a 300, 520, 700 e 960.

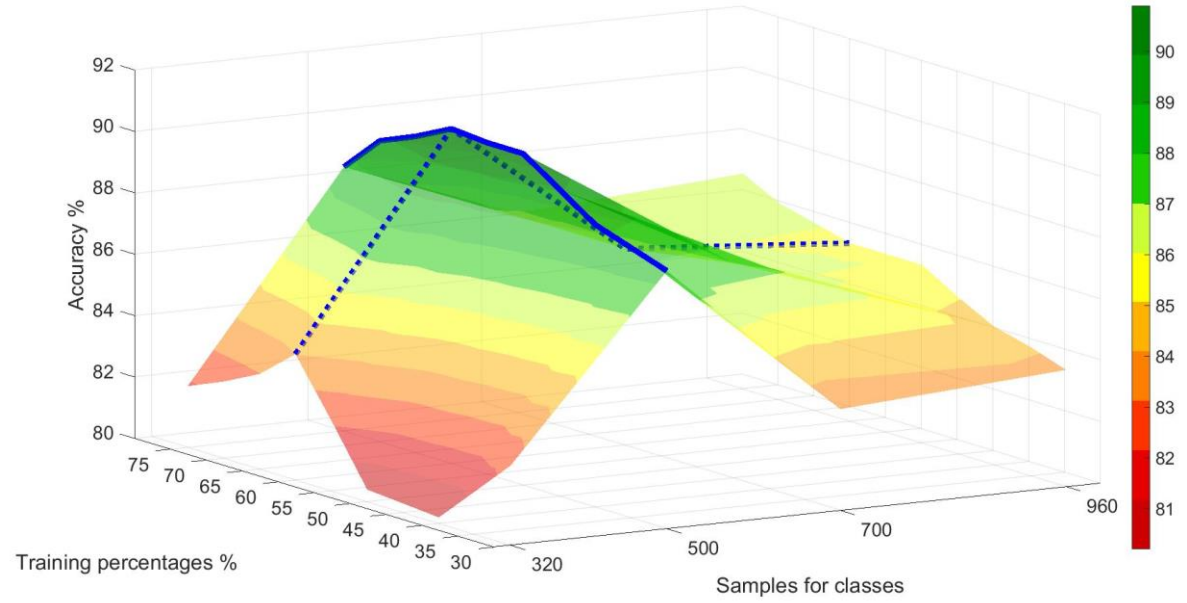

Figura 23: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 2

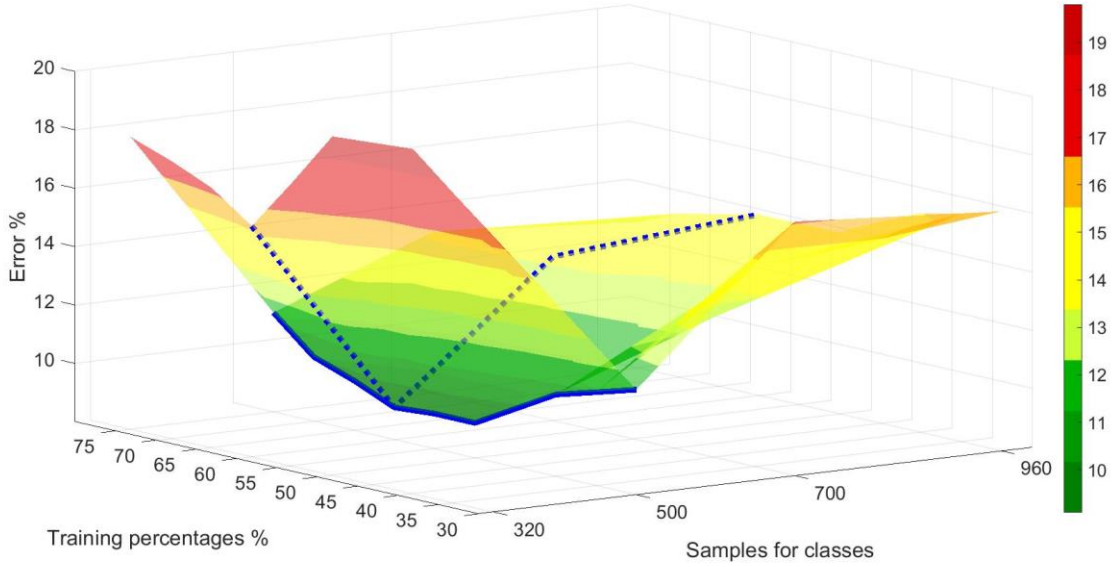

Figura 24: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 2

In questo livello si è registrato una massima variazione dell'accuratezza relativamente alla cardinalità 500, ottenendo una massima affidabilità pari al 90,9% .

Si riporta di seguito la matrice di confusione relativa ottenuta con una percentuale di allenamento pari al 60%

MATRICE DI CONFUSIONE		
n°cardinalità = 500	ANOMALIA REAL	MIX VUOTI REAL
ANOMALIA PREDICTED	0,913	0,087
MIX VUOTI PREDICTED	0,095	0,905

Tabella 4: Matrice di confusione LIVELLO 2 , 500 elementi per classe e 60% di training-set

Osservando la curva blu tratteggiata nel grafico dell'errore in figura 23 notiamo una somiglianza con le osservazioni relative al livello 1. La similitudine è in termini di numero critico di elementi, per i quali si mostra il valore massimo dell'errore, in corrispondenza di 960 elementi, prossimi ai 900 del livello 1.
Ci troviamo nel tratto iniziale del fenomeno del *double descent* in cui si osserva una iniziale discesa seguita da una salita.
Osservando la curva blu continua nel grafico 23, il comportamento non risulta essere distintamente definito a causa della piccola variabilità delle misure che potrebbe essere paragonabile alle incertezze a cui i valori potrebbero essere soggette.

4.4.3 Livello 3: Vuoti "semplici"/CLASSE C2

L'immagine dopo essere stata catalogata come "MIX VUOTI" viene sottoposto ad una successiva classificazione. Nel livello 3 all'algoritmo è stato insegnato a riconoscere se l'immagine contiene vuoti "semplici" o appartiene alla CLASSE 2. La classe 2 si ricorda essere quella contenente esempi di scavernameno e distacco. Il livello 3 e il successivo livello 4 sono quelli per i quali l'addestramento è avvenuto sfruttando un database di immagini non molto elevato dato che si sono sempre scalate in relazione al numero della classe con minori campioni.

Per il livello 3 l'addestramento è stato svolto con un numero massimo di campioni pari a 600 per la CLASSE C2 e 2200 per la classe VUOTI "SEMPLICI".

Si è fatta variare la percentuale del training-set del database in modo analogo ai livelli precedenti, mentre la cardinalità è stata fatta variare tra 300, 400, 500 e 600.

Come fatto per i precedenti livelli si è mostrato l'andamento dell'accuratezza e dell'errore in funzione della cardinalità e della percentuale di training. (fig,25 e 26)

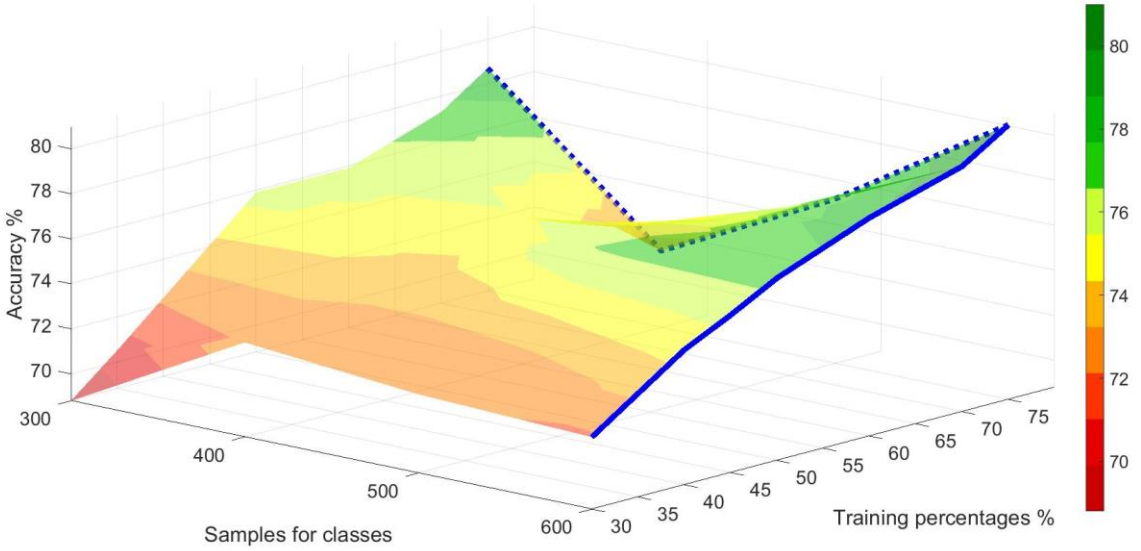

Figura 25: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 3

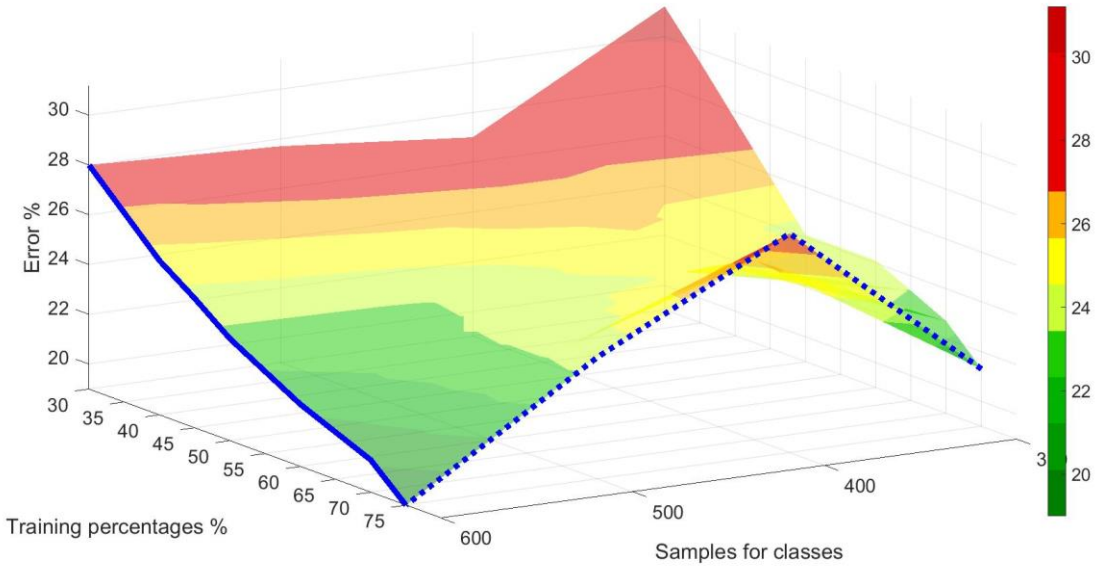

Figura 26: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 3

Gli andamenti mostrano un picco in corrispondenza della cardinalità 600 e percentuale di training pari al 75%, si mostra di seguito la matrice di confusione relativa:

MATRICE DI CONFUSIONE		
n°cardinalità = 600	VUOTI "SEMPLICI" REAL	CLASSE C2 REAL
VUOTI "SEMPLICI" PREDICTED	0,809	0,191
CLASSE C2 PREDICTED	0,189	0,811

Tabella 5: Matrice di confusione LIVELLO 3, 600 elementi per classe e 75% di training-set

Anche in questo caso ci concentriamo sull'osservazione degli andamenti delle due curve blu in figura 25 rappresentante l'errore nel test in funzione del numero di elementi per classe.

Osservando la linea tratteggiata si coglie un primo elemento differente rispetto ai casi precedenti relativamente alla posizione del picco. Dai risultati ottenuti, il picco è in

corrispondenza di un numero di campioni per classe pari a 400, al contrario dei livelli precedenti, dove il picco dell'errore nel test era in prossimità di 900 elementi per classe.

Se si ipotizza che effettivamente il picco si sia spostato a sinistra, il comportamento della curva mostrerebbe come la rete si sia servita di meno immagini in fase di addestramento per ottenere un errore minimo nel set di training . Questa ipotesi si traduce in una "migliore" capacità della rete, per quanto riguarda questo livello, nella classificazione delle immagini. La successiva discesa della curva, con una pendenza significativa del 4%, potrebbe far ipotizzare valor raggiungibili di errore nettamente minori per un maggior numero di elementi per classe.

La seconda ipotesi legata alla presenza di questo "picco" pari a 27.8% di errore, in prossimità di 400 elementi per classe, è dovuto al fatto che il valore relativo a 300 immagini, pari ad un errore del 21.3 %, sia in realità un punto di minimo locale e quindi la curva, per valori di elementi maggiori di quelli a disposizione, tenderà a presentare un effettivo picco in prossimità di 900 elementi, per poi assistere al fenomeno del *double descent*. Questa seconda ipotesi è giustificata dalla possibile presenza di incertezza dei valori di accuratezza.

In un secondo studio si indagheranno queste due ipotesi analizzando le incertezze statistiche dei valori e indagando il comportamento per un maggiore numero di elementi.

La curva blu continua nella figura 25 mostra un andamento discendente con una pendenza del 20%. Tale andamento non risulta indicativo per un confronto con gli andamenti precedenti. Anche in questo caso, l'andamento potrebbe essere giustificato da due differenti ipotesi. La prima è che la curva stia rappresentando una finestra di valori pre-picco, mentre la seconda ipotesi fa riferimento a un comportamento post -picco. Attraverso un secondo studio, analizzando un maggiore numero di elementi, sarà possibile comprendere l'effettivo fenomeno osservato.

4.4.4 Livello 4: Scavernamento/distacco di calcestruzzo

Il livello 4 consiste nell'indagare se l'elemento definito come appartenente alla CLASSE C2 appartenga ulteriormente o alla classe SCAVERNAMENTO o alla classe DISTACCO DI CALCESTRUZZO.

In questo ultimo caso si sono ottenute le accuratezze minori rispetto i casi precedenti per il non sufficiente numero di elementi posseduti.

Queste due classi sono caratterizzate da un numero massimo di elementi ciascuna pari a 520 nel caso della prima e 620 nella seconda classe.

Come fatto precedentemente la percentuale di allenamento del dataset è stata fatta variare da 30% al 75% con un passo del 5%, mentre la cardinalità per singola classe si è fatta variare tra 260, 400, 520 elementi. In funzione di essi si rappresentano in figura 27 e 28 gli andamenti dell'accuratezza e dell'errore.

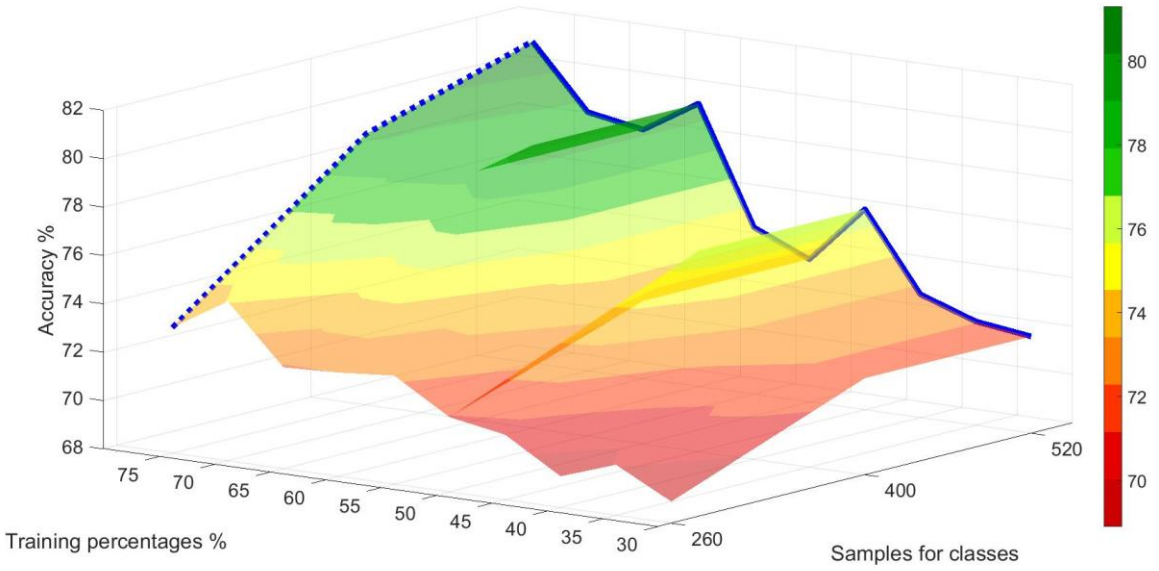

Figura 27: Grafico 3D dell'accuratezza ottenuta relativa al LIVELLO 4

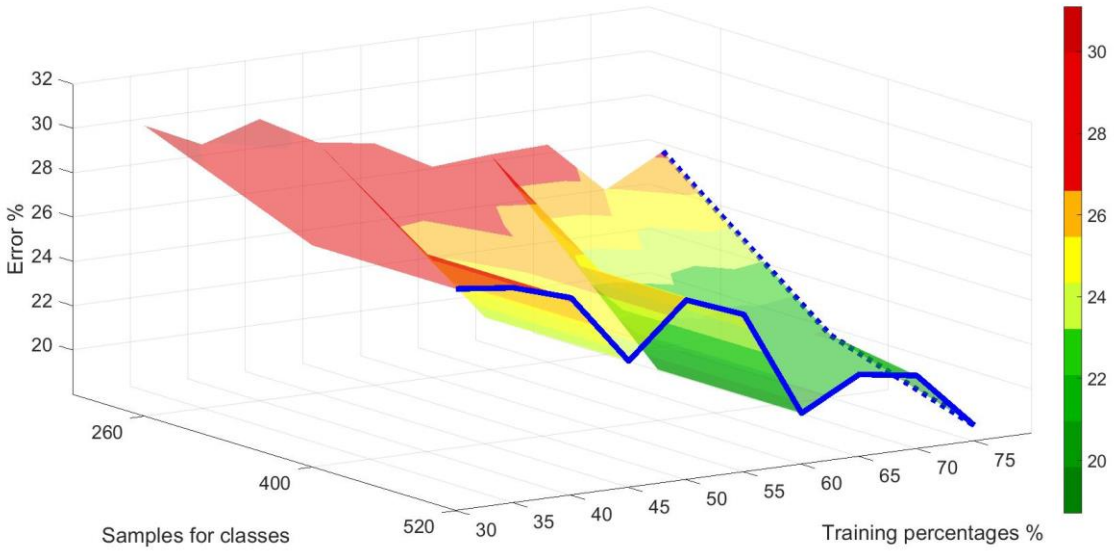

Figura 28: Grafico 3D dell'errore dell'algoritmo relativo al LIVELLO 4

In questo caso il migliore risultato si è ottenuto per un numero di elementi per classe pari a 520 e con una percentuale di allenamento del dataset pari a 75%. In questo modo si è ottenuto un valore di accuratezza pari all' 81%. Si riporta di seguito la matrice di confusione relativa per una migliore comprensione.

MATRICE DI CONFUSIONE		
n°cardinalità = 520	SCAVERNAMENTO REAL	DISTACCO DI CALCESTRUZZO REAL
SCAVERNAMENTO PREDICTED	0,776	0,224
DISTACCO DI CALCESTRUZZO PREDICTED	0,151	0,849

Tabella 6: : Matrice di confusione LIVELLO 4, 520 elementi per classe e 75% di training-set

Anche in questo ultimo livello, osservando l' andamento della curva blu tratteggiata e della curva blu continua, si evidenza un andamento discendente. Questo non permette di cogliere il

fenomeno del *double descent*. Tuttavia, il numero di elementi a disposizione non è tale da potere osservare un completo comportamento dato che la curva potrebbe rappresentare sia una finestra di valori facente parte di un tratto post-picco, sia essere rappresentativa di un comportamento pre-picco caratteristico del fenomeno del *double descent*. In un secondo studio verrà analizzata in dettaglio la questione attraverso un numero maggiore di elementi.

Conclusioni

Nel mondo dell'Ingegneria Civile, crolli e situazioni di degrado sono spesso presenti, causando, nel peggiore dei casi, vere e proprie catastrofi. Le infrastrutture rispondono spesso con risposte non lineari a stress esterni, reagendo in modo sproporzionato ad eventi di gravità inferiore.

L'interesse verso una maggiore comprensione dell'opera, delle sue condizioni al contorno e di tutte quelle caratteristiche capaci di dare un "allarme" all'ingegnere, è sempre più preponderante nel settore civile.

È per questo motivo che risulta indispensabile adoperare e sfruttare tutte le tecnologie disponibili; una di esse è l'intelligenza artificiale.

Nel corso del primo capitolo, è stato presentato l'ingente piano di manutenzione di ASPI, limitatamente al mondo delle gallerie, descrivendone il manuale delle ispezioni adottato.

Nel secondo capitolo sono state descritte le due tecniche non invasive, maggiormente utilizzate, come il Laserscanner e il Ground Penentrating Radar, mettendo in luce i vantaggi e gli svantaggi di entrambe.

Nel corso del terzo capitolo è stato descritto il manuale dei difetti utilizzato da ASPI ed è stata descritta l'esperienza in laboratorio, dove si è assistito all'esecuzione di tre tipologie di prove su campioni di carotaggi delle gallerie facenti parte delle varie campagne d'indagine.

Nel quarto capitolo è stata introdotta l'intelligenza artificiale applicata nel mondo delle infrastrutture. Da anni risulta essere una metodologia che è entrata a far parte di molti campi e anche nell'universo dell'Ingegneria Civile trova applicazione. L'obbiettivo consiste nell'utilizzo di tecniche d'intelligenza artificiale capaci di venire in aiuto e supporto all'ingegnere nel complesso problema di evidenziare, mediante tecniche robuste e non distruttive, la presenza di zone nevralgiche in una struttura.

Il lavoro di tesi trova qui il suo completo sviluppo, per mitigare e risolvere le problematiche relative alle attuali metodologie ispettive, lo scopo è proporre l'uso di una rete neurale convoluzionale in grado di svolgere una classificazione del danno multilivello.

In relazione al livello di dettaglio la rete ha mostrato risultati diversi ma promettenti.

Con una accuratezza di circa il 90-92% la rete è in grado di distinguere se il radargramma, fornitogli come input, rappresenta una zona danneggiata o meno. Se danneggiata, con la stessa

accuratezza, comprende se il difetto rappresenta una presenza di vuoti o presenza di anomalie. Fenomeni descritti in dettaglio all'interno del capitolo.

Con un'accuratezza dell'80% la rete riconosce la differenza tra vuoti privi di seconde indagini ispettive e immagini rappresentanti scavernamento e fenomeni di distacco del calcestruzzo.

L'ultimo livello ha mostrato un'accuratezza quasi prossima all'80% ma, con il possibile ottenimento di ulteriori dati G.P.R , è naturale aspettarsi un netto miglioramento dell'accuratezza, dato che per quest'ultimo livello si avevano a disposizione molti meno dati di allenamento.

I comportamenti degli errori nel test nei vari livelli hanno mostrato, in modo più o meno approssimativo, un comportamento noto come *deep double discent*, fenomeno scoperto solo recentemente, e in fase di aprrofondimento, come descritto dagli studi di Belkin et Al. (2019) e Nakkiran et Al. (2019).

Il lavoro di tesi proposto, per tali motivi, risulta essere un preliminare studio. I futuri sviluppi saranno relativi al maggior approfondimento dei seguenti punti:

1) Il miglioramento delle accuratezze degli ultimi due step della classificazione del danno multilivello attraverso l'utilizzo di più radargrammi;
2) Il paragone con altre reti neurali;
3) Incremento del dettaglio della classificazione del danno multilivello.
4) Studio delle incertezze statistiche delle accuratezze dei risultati della rete.

Inoltre, alla fine del terzo capitolo si sono sottolineati ulteriori due possibili sviluppi futuri.

I risultati ottenuti dall'addestramento della rete neurale convoluzionale possono essere messi in relazione e confrontati con i risultati delle prove di compressione, permeabilità e velocità degli ultrasuoni all'interno dei provini. L'obbiettivo risulterà essere la realizzazione di una combinazione delle due metodologie per ottenere una maggiore robustezza dei risultati.

Un altro possibile sviluppo risulterebbe essere l'utilizzazione di ulteriori algoritmi d'intelligenza artificiale addestrati mediante i risultati numerici delle prove di laboratorio e correlarli a diverse situazioni strutturali.

L'utilizzo di tecniche di intelligenza artificiale come quella proposta è di fondamentale importanza oggigiorno soprattutto nel mondo delle Infrastrutture.

L'automazione dei processi, la possibilità di gestione di grandi quantità di dati e la possibilità di apprendere in modo automatico relazioni non lineari e non appartenenti alla meccanica

classica, determinerebbero un maggiore controllo dei fenomeni, se applicati nelle fasi di progetto, ma ancora più importante, nelle fasi di manutenzione e ispezione.

Si sottolinea che l'utilizzo di queste tecniche di intelligenza artificiale non vogliono sostituire totalmente il giudizio della figura dell'ingegnere, ma essere di aiuto e di supporto decisionale ai fini del controllo della sicurezza strutturale.

Bibliografia

AUTOSTRADE PER L'ITALIA. 2020. Campo Prove Taratura Georadar Gallerie . 2020.

AUTOSTRADE PER L'ITALIA. 2020. Linee Guida indagine in galleria . 2020.

AUTOSTRADE PER L'ITALIA 2020. Piano di assessment delle gallerie autostradali della rete di Autostrade per l'Italia. 2020.

AUTOSTRADE PER L'ITALIA. 2020. Report sui criteri d'interpretazione dei rilievi effettuati con il laser scanner per l' individuazione delle tipologie di difettosita' esistenti in galleria . 2020.

AUTOSTRADE PER L'ITALIA, et al. 2020. Gallerie Autostradali Rivestimenti. Ispezioni, Servizi di ingegneria per indagini e progettazione: nuovo catalogo dei difetti. 2020. 2020.0027.001-R003-0.

CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS. 2015. Road tunnel civil engineering inspection guide Book 1: from disorder to analysis, from analysis to rating. 2015.

CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS. 2015. Road Tunnel Civil engineering inspection guide. Book 2: Catalogue of deteriorations. 2015.

CLERICI e Alberto, et al. 2005. Applicazioni del laser scanner terrestre a temi geologico-tecnici. Giornale di Geologia Applicata. 2005, Vol. 2, 328-333.

MASI, Angelo. 2005. La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive. s.l. : Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 2005.

BORNAZ, Leandro. Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione. Laser scanning terrestre, Atti del corso "La tecnica del laser scanning terrestre"(Udine 2004), Udine, CISM, 2006, 1-18.

DAWOOD, Thikra; ZHU, Zhenhua; ZAYED, Tarek. Deterioration mapping in subway infrastructure using sensory data of GPR. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103: 103487.

UNI, 1980. UNI 6130 (parte 1), Provini di calcestruzzo per prove di resistenza meccanica, settembre 1980.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), 1998. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI 228.2R-98, Detroit, Michigan.

BS, 1974. British Standard 4408: Part 5, Non- destructive Methods of Test for Concrete Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, London.

J. GASPARIK, 1992. Prove non distruttive nell'edilizia. Quaderno didattico AIPnD, Brescia.

J. H. BUNGEY, 1984. The influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing, da In Situ/ Non-destructive Testing of Concrete, ACI Publication SP-82.

MONTERO, Roberto, et al. Past, present and future of robotic tunnel inspection. *Automation in Construction*, 2015, 59: 99-112

BALAGUER, C., et al. Towards fully automated tunnel inspection: A survey and future trends. In: *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. IAARC Publications, 2014. p. 1.

ATTARD, Leanne, et al. Tunnel inspection using photogrammetric techniques and image processing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 144: 180-188.

MEDINA, Roberto, et al. Crack detection in concrete tunnels using a gabor filter invariant to rotation. *Sensors*, 2017, 17.7: 1670.

MAKANTASIS, Konstantinos, et al. Deep supervised learning for hyperspectral data classification through convolutional neural networks. In: 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2015. p. 4959-4962.

JAMES, G., et al. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R Springer Publishing Company. *Incorporated.[Google Scholar]*, 2014.

BARRACO, Ignazio. *Valutazione delle prestazioni delle Reti Neurali Convoluzionali su immagini affette da distorsione= Performance analysis of Convolutional Neural Network applied on distorted images*. 2019. PhD Thesis. Politecnico di Torino.

LIN, Tsung-Yi, et al. Microsoft coco: Common objects in context. In: *European conference on computer vision*. Springer, Cham, 2014. p. 740-755.

SIMONYAN, Karen; ZISSERMAN, Andrew. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.

VENTURA, Antonino. *Estrazione di relazioni semantiche frequenti tra oggetti in immagini segmentate*. 2020. PhD Thesis. Politecnico di Torino.

HE, Kaiming, et al. Deep residual learning for image recognition. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. p. 770-778.

KRIZHEVSKY, Alex; SUTSKEVER, Ilya; HINTON, Geoffrey E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, 25: 1097-1105.

PROTOPAPADAKIS, Eftychios; DOULAMIS, Nikolaos. Image based approaches for tunnels' defects recognition via robotic inspectors. In: International Symposium on Visual Computing. Springer, Cham, 2015. p. 706-716.

FRID-ADAR, Maayan, et al. GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification. *Neurocomputing*, 2018, 321: 321-331.

KRIZHEVSKY, Alex; SUTSKEVER, Ilya; HINTON, Geoffrey E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Communications of the ACM, 2017, 60.6: 84-90

TAN, Kai, et al. Correction of mobile TLS intensity data for water leakage spots detection in metro tunnels. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2016, 13.11: 1711-1715.

XU, Teng, et al. Detection of water leakage in underground tunnels using corrected intensity data and 3D point cloud of terrestrial laser scanning. *IEEE Access*, 2018, 6: 32471-32480.

ZHAO, Shuai; ZHANG, Dong Ming; HUANG, Hong Wei. Deep learning–based image instance segmentation for moisture marks of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103156.

JO, HyunJun; NA, Yong-Ho; SONG, Jae-Bok. Data augmentation using synthesized images for object detection. In: *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2017. p. 1035-1038.

REICHMAN, Daniël; COLLINS, Leslie M.; MALOF, Jordan M. Some good practices for applying convolutional neural networks to buried threat detection in ground penetrating radar. In: *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. IEEE, 2017. p. 1-5.

DING, Junhua; LI, XinChuan; GUDIVADA, Venkat N. Augmentation and evaluation of training data for deep learning. In: *2017 IEEE international conference on big data (big data)*. IEEE, 2017. p. 2603-2611.

ZHONG, Zhun, et al. Random erasing data augmentation. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2020. p. 13001-13008.

HUSSAIN, Zeshan, et al. Differential data augmentation techniques for medical imaging classification tasks. In: *AMIA Annual Symposium Proceedings*. American Medical Informatics Association, 2017. p. 979.

YU, Seung-Nam; JANG, Jae-Ho; HAN, Chang-Soo. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel. *Automation in Construction*, 2007, 16.3: 255-261.

MOHAN, Arun; POOBAL, Sumathi. Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57.2: 787-798.

QI, Dapeng, et al. An algorithm to detect the crack in the tunnel based on the image processing. In: *2014 Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. IEEE, 2014. p. 860-863.

ZHANG, Wenyu, et al. Automatic crack detection and classification method for subway tunnel safety monitoring. *Sensors*, 2014, 14.10: 19307-19328.

CHEN, Liang-Chien; JAN, Huang-Hsiang; HAUNG, C. W. Mensuration of concrete cracks using digital close-range photographs. In: *Proceedings of the 22th Asian Conference on Remote Sensing, Singapore*. 2001. p. 1248-1253.

YAMAGUCHI, Tomoyuki; HASHIMOTO, Shuji. Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing. *Machine Vision and Applications*, 2010, 21.5: 797-809.

HUANG, Hongwei, et al. Inspection equipment study for subway tunnel defects by grey-scale image processing. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, 32: 188-201.

LIU, Zhiwei, et al. Tunnel crack detection and classification system based on image processing. In: *Machine Vision Applications in Industrial Inspection X*. International Society for Optics and Photonics, 2002. p. 145-152.

QU, Zhigang, et al. A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system. *Measurement*, 2010, 43.4: 513-519.

MOON, Hyeong-Gyeong, et al. Intelligent crack detecting algorithm on the concrete crack image using neural network. *Proceedings of the 28th ISARC*, 2011, 1461-1467.

PASOLLI, Edoardo, et al. Automatic detection and classification of buried objects in GPR images using genetic algorithms and support vector machines. In: IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2008. p. II-525-II-528.

DAVIS, Allen G.; LIM, Malcolm K.; PETERSEN, Claus Germann. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods. *NDT & E International*, 2005, 38.3: 181-186.

AL-NUAIMY, W., et al. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. *Journal of applied Geophysics*, 2000, 43.2-4: 157-165.

YANG, Senlin, et al. Defect segmentation: Mapping tunnel lining internal defects with ground penetrating radar data using a convolutional neural network. *arXiv preprint arXiv:2003.13120*, 2020.

XIANG, Lei, et al. GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study. Ndt & E International, 2013, 59: 68-76

CHEN, Huihong; LIU, Shiming. Advanced geological prediction technology of tunnel based on image recognition. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12.19: 1-6.

SHAW, M. R., et al. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks. *Ndt & E International*, 2005, 38.3: 203-212.

SZYMCZYK, Piotr; TOMECKA-SUCHOŃ, Sylwia; SZYMCZYK, Magdalena. Neural networks as a tool for georadar data processing. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2015, 25.4: 955-960

ABDEL-QADER, Ikhlas; ABUDAYYEH, Osama; KELLY, Michael E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, 17.4: 255-263.

NISHIKAWA, Takafumi, et al. Concrete crack detection by multiple sequential image filtering. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012, 27.1: 29-47.

VICTORES, J. G., et al. Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration. *Automation in Construction*, 2011, 20.5: 629-636.

HUANG, Hong-wei; LI, Qing-tong; ZHANG, Dong-ming. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 2018, 77: 166-176.

ASADI, Pouria; GINDY, Mayrai; 1ALVAREZ, Marco. A machine learning based approach for automatic rebar detection and quantification of deterioration in concrete bridge deck ground penetrating radar B-scan images. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23.6: 2618-2627

TRELA, Ch; KIND, Th; SCHUBERT, Marcus. Detection of air voids in concrete by radar in transmission mode. In: *2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. IEEE, 2015. p. 1-4.

JAW, Siow Wei; HASHIM, Mazlan. Accuracy of data acquisition approaches with ground penetrating radar for subsurface utility mapping. In: *2011 IEEE International RF & Microwave Conference*. IEEE, 2011. p. 40-44.

SHAO, Wenbin, et al. Automatic classification of ground-penetrating-radar signals for railway-ballast assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49.10: 3961-3972.

TORRIONE, Peter A., et al. Histograms of oriented gradients for landmine detection in ground-penetrating radar data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2013, 52.3: 1539-1550.

LONGADGE, Rushi; DONGRE, Snehalata. Class imbalance problem in data mining review. arXiv preprint arXiv:1305.1707, 2013.

DOSSI, Martina. Un approfondimento sul problema della classificazione in presenza di una classe rara. 2018.

HE, Haibo; GARCIA, Edwardo A. Learning from Imbalanced Data IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering v. 21 n. 9. 2009.

HE, Kaiming; SUN, Jian. Convolutional neural networks at constrained time cost. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. p. 5353-5360.

HE, Kaiming, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2015, 37.9: 1904-1916.

GATTO, Lorenzo. Apprendimento continuo per il riconoscimento di immagini. 2017

NAKKIRAN, Preetum, et al. Deep double descent: Where bigger models and more data hurt. arXiv preprint arXiv:1912.02292, 2019.

BELKIN, Mikhail, et al. Reconciling modern machine-learning practice and the classical bias–variance trade-off. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116.32: 15849-15854.