



**Politecnico  
di Torino**

Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il  
Territorio  
Indirizzo Rischi Naturali e Protezione Civile

# **Utilizzo di dati ad alta risoluzione geometrica per l'analisi del dissesto stradale**

**Relatore**

Prof. Boccardo Piero

**Correlatore**

Ing. Crova Roberto

**Candidata**

Di Vinci Giulia

A.a. 2024/2025

## Sommario

INTRODUZIONE .....	4
1. INFRASTRUTTURE STRADALI .....	6
1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI .....	6
1.2 DISSESTI STRADALI .....	8
1.3 INDIVIDUAZIONE DEI DISSESTI .....	21
1.3.1 Rilievo profilo .....	22
1.3.2 Validità delle misurazioni e analisi della pavimentazione: gli indici di stato .....	26
1.3.3 Altri indici di irregolarità .....	30
1.4 PIANO DI MANUTENZIONE .....	37
1.4.1 Fasi del Processo di Pianificazione della Manutenzione .....	37
1.5 SISTEMI DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE .....	38
1.5.1 L'organizzazione del sistema .....	38
1.5.2 Modelli previsionali.....	38
1.6 GESTIONE MANUTENZIONE IN ANAS .....	41
1.6.1 Road ANAS Network Internet of Things (RANIoT) .....	43
2. MOBILE MAPPING SYSTEM .....	45
2.1 I DIVERSI SENSORI NEGLI MMS .....	46
2.1.1 Sensori di posizionamento .....	47
2.1.2 Sensori per la raccolta dati .....	49
2.2 PIATTAFORME PER MMS.....	53
2.3 STEP DI LAVORO DEGLI MMS .....	57
2.4 APPLICAZIONI .....	60
2.5 MMS DIGITARCA .....	63
2.6 TREND FUTURI.....	67
3. RICONOSCIMENTO DISSESTI STRADALI .....	69
3.1 APPROCCIO SEMI-AUTOMATICO.....	70
3.2 APPROCCIO AUTOMATICO.....	81
3.2.1 SOFTWARE LIDAR360MLS .....	82
3.2.2 PASSAGGI INIZIALI APPROCCIO AUTOMATICO .....	84
4. COLLAUDO DEI DATI ESTRATTI CON I TECNICI DEL COMUNE DI TORINO .....	90
5. ELABORATI FINALI .....	94
5.1 MAPPA TEMATICA DELL'AREA DI CIT TURIN.....	94
5.2 STIMA DEI COSTI PER IL RIPRISTINO E PROBLEMATICHE.....	109

6. CONCLUSIONE E SPUNTI MIGLIORAMENTI FUTURI .....	113
BIBLIOGRAFIA .....	115

# INTRODUZIONE

Le infrastrutture stradali rappresentano un elemento fondamentale per la mobilità e lo sviluppo economico di un paese. Il corretto funzionamento delle strade garantisce sicurezza, efficienza nei trasporti e riduzione dei costi di gestione della rete viaria. Tuttavia, il degrado delle pavimentazioni stradali, dovuto a fattori ambientali e al passaggio continuo di veicoli, rappresenta una sfida costante per le amministrazioni e gli Enti preposti alla manutenzione. L'analisi del dissesto stradale, dunque, riveste un ruolo cruciale nella pianificazione degli interventi di manutenzione, al fine di ottimizzare le risorse economiche e migliorare la qualità delle infrastrutture.

Questa tesi si propone di approfondire l'utilizzo di dati ad alta risoluzione geometrica per l'analisi del dissesto stradale, con un focus specifico sulle pavimentazioni bituminose. L'adozione di tecniche avanzate di acquisizione dati consente di ottenere una mappatura dettagliata dello stato delle strade, individuando le principali criticità e fornendo informazioni utili alla programmazione degli interventi di ripristino. In particolare, l'analisi si concentrerà sull'acquisizione terrestre e la conseguente analisi dell'area del manto stradale adibito alla circolazione veicolare, escludendo i marciapiedi.

Uno degli aspetti più rilevanti di questo lavoro è il processo di analisi svolto in collaborazione con i tecnici del Comune di Torino. Attualmente, l'amministrazione comunale dispone di dati risalenti al 2009, e la gestione delle segnalazioni relative ai dissesti stradali avviene principalmente attraverso report telefonici da parte dei cittadini o tramite ispezioni visive effettuate da dipendenti comunali inviati sul territorio per raccogliere informazioni fotografiche. Questo metodo, seppur utile, risulta limitato nella capacità di fornire una visione complessiva e dettagliata dello stato effettivo della rete stradale.

L'approccio adottato in questa ricerca si propone quindi come un'alternativa più sistematica e oggettiva, permettendo di aggiornare le informazioni disponibili con dati accurati e georeferenziati. Attraverso l'impiego di tecnologie avanzate, come il Mobile Mapping System (MMS), è stato possibile effettuare un rilievo dettagliato delle strade, raccogliendo informazioni precise sulla tipologia e l'entità dei dissesti. L'analisi ha previsto diverse fasi, a partire dalla classificazione delle anomalie fino alla loro rappresentazione su una mappa tematica, utile per la pianificazione degli interventi manutentivi.

L'elaborato inizia da una descrizione generale delle infrastrutture stradali e delle tipologie di pavimentazioni, verranno poi analizzati i principali dissesti stradali, suddivisi in categorie in base alla loro natura e alle cause scatenanti. Saranno successivamente approfondite le metodologie di rilievo e monitoraggio delle irregolarità della pavimentazione, in uso sia all'estero che in Italia, con un'attenzione particolare agli strumenti di misurazione e agli indicatori di stato, come l'IRI (International Roughness Index) e il PCI (Pavement Condition Index).

La ricerca si concentra poi sull'uso del Mobile Mapping System (MMS), una tecnologia innovativa che consente l'acquisizione rapida e dettagliata di dati geospaziali attraverso veicoli strumentati con sensori avanzati. Verranno esaminati i diversi componenti degli MMS, tra cui sensori di posizionamento e quelli di acquisizione dati.

Un focus specifico sarà dedicato all'analisi automatica e semi-automatica dei dissesti stradali, illustrando i principali algoritmi e software impiegati per il riconoscimento e la classificazione dei difetti superficiali.

Infine, la tesi presenterà quindi le metodologie impiegate per il riconoscimento dei difetti superficiali e la classificazione delle strade dell'area di Cit Turin (Fig.1), un quartiere della città di Torino, dove sono



stati condotti i rilievi tramite MMS da parte di Digitalca s.r.l. Si riporteranno l'analisi automatica e semi-automatica dei dissesti stradali, illustrando i principali algoritmi e software utilizzati.



Figura 1 – Inquadramento area Cit Turin, scala 1:10000

Verrà inoltre effettuata una stima dei costi di ripristino e saranno riportate le problematiche connesse alla gestione della manutenzione stradale a livello comunale e alla metodologia utilizzata, suggerendo delle possibili soluzioni. Questo studio non ha solo una valenza teorica, ma ha un impatto concreto e pratico per il Comune di Torino, fornendo informazioni aggiornate che possono essere effettivamente utilizzate per la pianificazione degli interventi manutentivi.

L'obiettivo di questa ricerca è dimostrare come l'integrazione di tecnologie avanzate nell'analisi del dissesto stradale possa migliorare significativamente la qualità delle informazioni a disposizione degli enti gestori, permettendo interventi più mirati ed efficienti. L'adozione di sistemi di acquisizione dati ad alta risoluzione geometrica, combinata con algoritmi di analisi automatizzata, rappresenta una prospettiva promettente per il futuro della gestione e manutenzione delle infrastrutture stradali.

# 1. INFRASTRUTTURE STRADALI

L'infrastruttura stradale, facente parte del più generale insieme delle infrastrutture di trasporto, è l'insieme delle opere civili e dei sistemi necessari per garantire la mobilità su strada di persone e merci. Essa comprende reti viarie di diversa tipologia, tra cui autostrade, strade di grande comunicazione, viabilità regionale e comunale.

In Italia, la rete stradale conta circa 173.000 km, di cui circa 30.000 km sono gestiti dall'ANAS (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade), mentre gli enti locali e le concessionarie autostradali gestiscono i restanti chilometri.

Il Codice della Strada (Decreto Legislativo 30 aprile 1992, n. 285) disciplina la costruzione e la tutela delle strade, prevedendo obblighi specifici per gli enti proprietari.

Questi ultimi, sono responsabili di garantire la sicurezza e la fluidità del traffico stradale attraverso una serie di interventi, quali occuparsi della manutenzione, della gestione e della pulizia delle strade e delle aree ad esse adiacenti, inclusi gli impianti, le attrezzature e i servizi. Inoltre, è loro compito monitorare l'efficienza tecnica delle strade e delle relative pertinenze, assicurandosi che tutto sia in buono stato. Devono anche installare e mantenere la segnaletica stradale prevista.

Oltre a queste attività, gli enti proprietari rilasciano le autorizzazioni e le concessioni relative alle strade e sono tenuti a segnalare alle forze di polizia le violazioni delle normative. In caso di interventi straordinari sulla sede stradale, come lavori di manutenzione, devono garantire la realizzazione di percorsi ciclabili, rispettando i piani urbanistici degli enti locali, salvo che non vi siano problemi di sicurezza.

Per le strade in concessione, i compiti e i poteri dell'ente proprietario sono delegati al concessionario, a meno che non sia previsto diversamente. Nel caso delle strade vicinali, le funzioni dell'ente proprietario sono svolte dal comune.

Inoltre, i proprietari delle strade devono garantire la manutenzione delle ripe che si trovano lungo i lati delle strade, sia a monte che a valle. Questo per prevenire frane o cedimenti del terreno che possano compromettere la sicurezza del corpo stradale, rimuovendo materiali pericolosi e realizzando eventuali opere di sostegno. Devono anche evitare qualsiasi intervento che potrebbe causare questi rischi.

## 1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI

La pavimentazione stradale è la sovrastruttura su cui transitano i veicoli, progettata per garantire nel tempo sicurezza e comfort di guida. La sua funzione principale è distribuire sul terreno sottostante, noto come sottofondo, le sollecitazioni statiche e dinamiche generate dal traffico. Inoltre, deve offrire una superficie di rotolamento regolare, poco soggetta a deformazioni, e proteggere il sottofondo dagli agenti atmosferici.

Per assolvere efficacemente al suo ruolo, la pavimentazione deve soddisfare sia requisiti strutturali che funzionali. I requisiti strutturali riguardano la capacità di sopportare i carichi dei veicoli (portanza) e la resistenza al degrado nel tempo (durabilità), fattori strettamente legati alla tipologia della sovrastruttura, in particolare ai materiali impiegati e allo spessore degli strati. I requisiti funzionali, invece, dipendono dall'interazione tra pneumatici e superficie stradale e sono fondamentali per il comfort e la sicurezza della guida. Tra questi, rientrano la regolarità della pavimentazione e il livello di aderenza tra pneumatici e manto stradale.



La pavimentazione stradale è composta da più strati sovrapposti, realizzati con materiali diversi, ciascuno con una funzione specifica. Le caratteristiche di ogni strato variano in base al tipo di sovrastruttura stradale e alle sollecitazioni, sia dovute al traffico che alle condizioni ambientali, a cui sarà esposta nel corso della sua vita utile. In base alle proprietà dei materiali impiegati e allo spessore degli strati, le pavimentazioni stradali si suddividono in tre principali categorie: flessibili, semi-rigide e rigide (Fig.2).

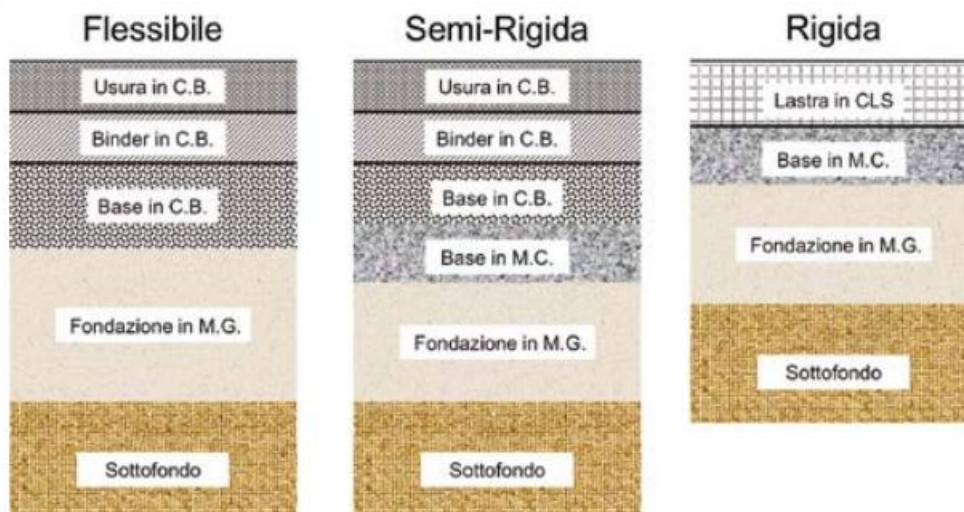


Figura 2 – composizione stratigrafica delle diverse tipologie di pavimentazione stradale (tratta dal quaderno tecnico n.17 ANAS, volume 5)

Tipicamente gli strati che si possono individuare sono:

- Usura
- Binder
- Base
- Fondazione
- Sottofondo

Riportati per qualità via via decrescente, dallo strato più superficiale a quello più profondo.

Ci si focalizzerà sulle pavimentazioni flessibili, in quanto risultano la tipologia più presente nella rete viaria urbana ed extraurbana, e sono oggetto preponderante degli interventi di manutenzione sulla rete stradale nazionale.

Queste sono costituite da un pacchetto strutturale in conglomerato bituminoso (C.B.), che include gli strati di usura, binder e base, il quale poggia su uno strato di fondazione in misto granulare (M.G.), che può essere stabilizzato o meno, il quale trasferisce i carichi al sottofondo, ovvero il terreno di appoggio. Questa tipologia di pavimentazione permette una distribuzione del carico al sottofondo più graduale.

STRATO	FUNZIONE	MATERIALI
USURA	REGOLARITÀ E ADERENZA	CONGLOMERATO BITUMINOSO
BINDER	COLLEGAMENTO	CONGLOMERATO BITUMINOSO
BASE	STRUTTURALE RIPARTIZIONE DEI CARICHI	CONGL. BITUMINOSO MISTI CEMENTATI
FONDAZIONE	TRASMISSIONE DEI CARICHI AL SOTTOFONDO	MISTI GRANULARI TERRE STABILIZZATE
SOTTOFONDO	ASSORBIMENTO E DISSIPAZIONE DEI CARICHI	TERRE STABILIZZATE

Figura 3 – Funzioni degli strati delle pavimentazioni flessibili (tratta dal quaderno tecnico n.17 ANAS, volume 5)

## 1.2 DISSESTI STRADALI

Le pavimentazioni stradali, come accennato precedentemente, sono soggette a varie tipologie di ammaloramenti dettati da diverse cause.

Innanzitutto, si possono dividere i dissesti in due categorie come segue:

- Superficiali: riguardano lo strato di usura, hanno un impatto significativo sull'interazione tra pneumatico e pavimentazione
- Strutturali: riguardano l'intera sovrastruttura causando un deterioramento generale della pavimentazione, compromettendone la capacità portante; inoltre, influisce negativamente anche sulle caratteristiche superficiali, influenzando in particolare sulla regolarità del piano viabile.

La letteratura offre differenti modalità di catalogazione dei dissesti in funzione del tipo di pavimentazione flessibile, semirigide o rigida (Fig.4).

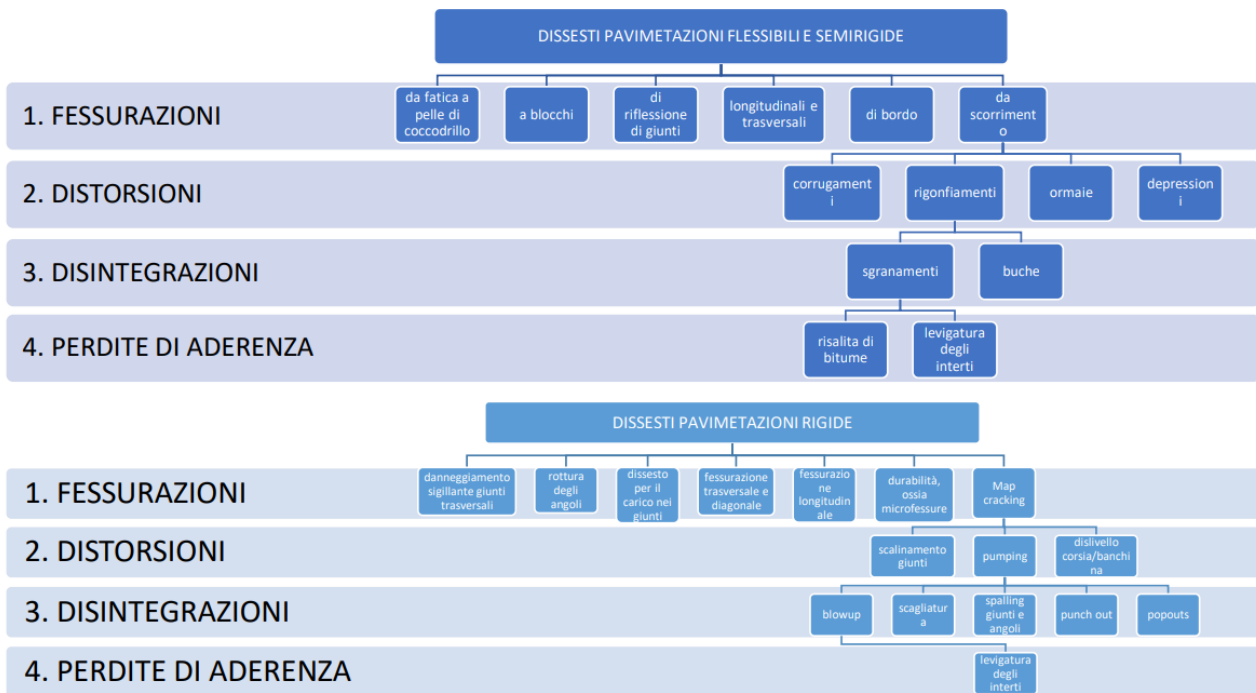


Figura 4 – Ammaloramenti riconosciuti per le diverse pavimentazioni stradali (tratta da Santagata F.A., *Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali vol.2*, Pearson Italia, Milano, Torino, 2016)

Focalizzandosi sulle pavimentazioni flessibili, l'ANAS, nel quaderno tecnico volume 5, specifica 5 macrocategorie, una in più rispetto a quelle visibili in Fig. 4, ma per lo più coerenti:

- fessurazioni, distinguibili in diverse tipologie a seconda della conformazione e delle cause (tra esse sono identificabili: fessurazioni ramificate o “a pelle di coccodrillo”, a blocchi, di bordo, di riflessione dei giunti, trasversali e longitudinali, da scorrimento);
- distorsioni, vale a dire alterazioni della regolarità della pavimentazione (ormai, scorrimenti, rigonfiamenti e depressioni, corrugamenti, cedimenti del margine della carreggiata);
- pelature e sgranamenti (buche, disgregazioni e distacchi);
- alterazioni del piano di rotolamento degli pneumatici (perdite di aderenza: risalita di bitume, levigatura degli aggregati);
- rappezzati.

Si citano ancora le 20 categorie di dissesti, individuate in “Pavement Management for airports, roads and parking lots” di M.Y. Shain, e in “Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys”, di FAA – AC 150/5380-6, così da avere una visione completa.

1. Fessurazione “a pelle di coccodrillo” o “a ragnatela” (alligator cracking): una rete di fessure interconnesse (Fig.5,6) dovute alla rottura per fatica (Fig.7) della superficie stradale, provocata dalle continue sollecitazioni dei veicoli in transito. Le crepe iniziano a formarsi nella parte inferiore del conglomerato, dove la tensione di trazione è maggiore. Con l'aumento e la ripetizione dei carichi, compaiono fessure longitudinali, solitamente lungo le tracce delle ruote. Col passare del tempo, queste crepe si espandono e si collegano, dando origine a frammenti con angoli acuti e forme irregolari, creando un motivo caratteristico simile al dorso di un alligatore o di un coccodrillo. Questo tipo di degrado si manifesta spesso insieme al fenomeno dell'ormaiamento. La presenza di fessurazioni facilita l'infiltrazione dell'umidità nella base e nel sottofondo,

accelerando il deterioramento della pavimentazione e portando, se non si interviene tempestivamente, alla formazione di buche e alla progressiva disintegrazione della strada.



Figura 5 – Fessurazione a ragnatela



Figura 6 - Fessurazione a ragnatela

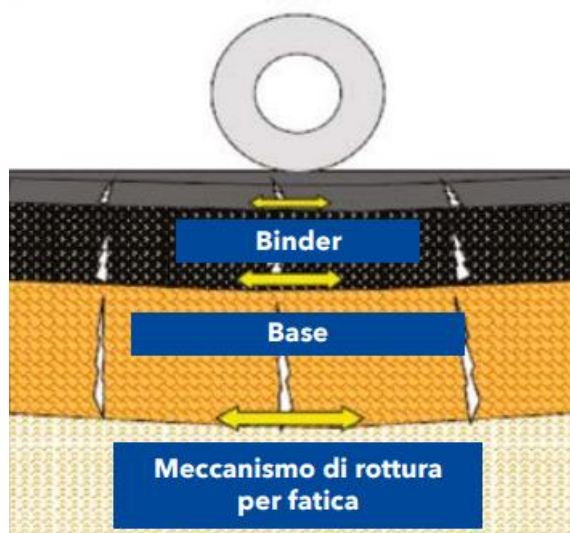


Figura 7 – Schematizzazione del meccanismo di rottura per fatica (tratta dal quaderno tecnico vol.5 ANAS)

2. Fessurazione a blocchi (block cracking): fessure interconnesse (Fig.8) che suddividono la pavimentazione in blocchi di forma rettangolare, con dimensioni variabili tra  $0,1 \text{ m}^2$  e  $10 \text{ m}^2$ . I blocchi di maggiori dimensioni sono generalmente classificati come fessure longitudinali e trasversali. Questo tipo di degrado è causato dal ritiro della miscela bituminosa, dovuto alle variazioni cicliche di temperatura, spesso aggravato dall'invecchiamento del legante, o da una

scelta inadeguata dello stesso, durante la fase di progettazione della miscela (mix design). A differenza di altre fessurazioni, non sono influenzate dal passaggio dei veicoli, motivo per cui possono essere osservate anche in aree non soggette al traffico.



*Figura 8 – Fessurazione a blocchi*

3. Fessurazione di bordo (edge cracking): presentano (Fig.9) una forma curva e si sviluppano lungo i bordi della pavimentazione, generalmente entro una fascia di circa 60 cm. La loro formazione è causata dall'azione del gelo nello strato di sottofondo, un fenomeno che viene ulteriormente aggravato dal passaggio dei veicoli.



*Figura 9 – Fessurazione di bordo*

4. Fessurazione longitudinale e trasversale (longitudinal and transverse cracking): le prime si sviluppano parallelamente all'asse longitudinale della pavimentazione (Fig.10,11). Possono derivare da un'errata costruzione o dal posizionamento errato dei giunti, i quali rappresentano zone meno compatte della pavimentazione e non dovrebbero essere collocati lungo le traiettorie delle ruote, per ridurre l'impatto dei carichi. Possono inoltre formarsi per l'estensione di crepe derivanti da strati sottostanti, per effetto della fatica del materiale o a causa delle variazioni termiche giornaliere. Le fessurazioni trasversali, invece, si sviluppano perpendicolarmente alla linea centrale della strada o alla direzione di posa della pavimentazione. Tipicamente di origine termica, sono generate dal ritiro della miscela bituminosa a causa dell'esposizione a basse temperature o all'indurimento del legante bituminoso. Possono anche manifestarsi come crepe riflesse, originate da fessurazioni preesistenti negli strati inferiori della pavimentazione.





*Figura 10 – Fessurazione longitudinale*



*Figura 11 – Fessurazione trasversale*

5. Fessurazione di richiamo (Joint Reflection Cracking): si manifesta esclusivamente nelle pavimentazioni miste, costituite da lastre di cemento ricoperte da uno strato di conglomerato bituminoso. Le crepe si formano in corrispondenza dei giunti rigidi della pavimentazione sottostante, a causa dei movimenti della soletta di cemento dovuti alle variazioni di temperatura e umidità. L'azione del traffico può accelerarne il degrado. Queste sollecitazioni producono uno sforzo di taglio, di conseguenza le fessure tendono a propagarsi orizzontalmente, aumentando il rischio di separazione tra lo strato di conglomerato bituminoso e la soletta in cemento (Fig.12).



*Figura 12 – Fessurazione di richiamo*

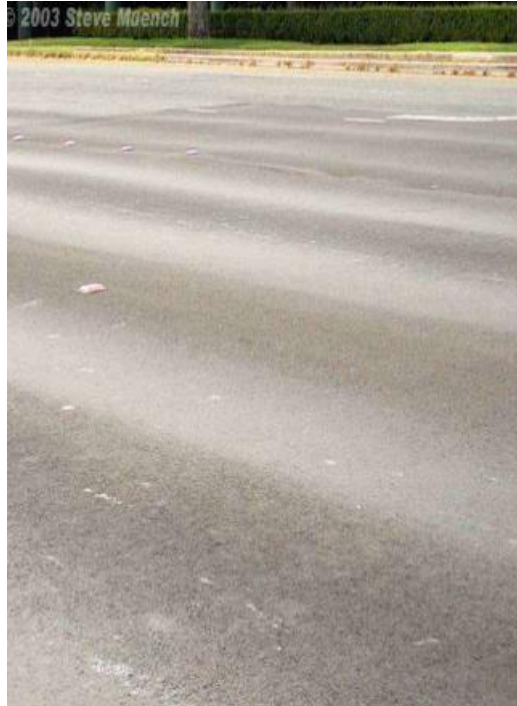


6. Fessurazione da scorrimento (slippage cracking): causate dalla frenata o dalla rotazione delle ruote, che inducono scivolamento e deformazione della superficie, questa tipologia ha una forma a mezzaluna, tipicamente con le estremità rivolte nella direzione del traffico. La deformazione e lo scivolamento si manifestano principalmente a causa di una scarsa resistenza delle miscele superficiali o di un legame insufficiente tra lo strato superiore e quello sottostante nella pavimentazione. Questi difetti sono più frequenti nelle curve, nelle zone con forti pendenze e nelle intersezioni.



*Figura 13 – Fessurazione da scorrimento*

7. Risalti e sacche (bumps and sags): i primi sono piccoli dossi superficiali e sono conseguenza della presenza di materiale organico nelle crepe, acqua che ghiaccia, o ancora per instabilità della pavimentazione. Le sacche sono degli avvallamenti della superficie.
8. Ormaiamento (rutting): sono depressioni che si formano lungo le traiettorie percorse dai veicoli (Fig.14), risultando particolarmente evidenti a seguito di precipitazioni a causa dell'accumulo di acqua. Esistono due tipi principali di solchi: misti e profondi. I primi si verificano quando il sottofondo rimane intoccato, e la deformazione interessa solo gli strati superiori, spesso a causa di difetti di compattazione o errori di progettazione. Quello profondo, invece, si manifesta quando anche il sottofondo subisce cedimenti dovuti ai carichi e a una struttura della pavimentazione inadeguata, causando un abbassamento complessivo della carreggiata. In entrambi i casi, si può verificare un sollevamento della pavimentazione ai lati delle ormaie. Il ristagno di acqua in questi solchi a seguito delle piogge aumenta il rischio di aquaplaning, compromettendo la sicurezza stradale.



*Figura 14 - Ormaiamento*

9. Ondulazioni (corrugations): sono individuate dal susseguirsi di valli e creste in maniera regolare sulla superficie stradale, perpendicolarmente rispetto alla direzione di circolazione. Sono causate dalle sollecitazioni dei veicoli, tipicamente dove questi si fermano e ripartono. Si devono spesso a un mix design inadeguato, a un'elevata umidità del sottofondo o ancora all'assenza di aerazione delle emulsioni di asfalto in fase liquida.



*Figura 15 - Ondulazioni*

10. Depressioni (depressions): sono aree ad una quota leggermente inferiore rispetto a quelle limitrofe (Fig.16,17). Dovute tipicamente a cedimenti del sottofondo, o da una compattazione errata durante la costruzione della pavimentazione, costituiscono un rischio per la sicurezza in quanto cause di aquaplaning a seguito di precipitazioni.



*Figura 16 - Depressioni*



*Figura 17 - Depressioni*

11. **Buche (potholes):** rappresentano uno dei danni stradali più comuni, caratterizzandosi per una forma circolare con un diametro generalmente inferiore al metro (Fig.18,19). Sebbene siano visibili sulla superficie, si estendono in profondità fino allo strato di base, presentando bordi netti e pareti verticali. La loro espansione può essere accelerata dalla presenza di acqua, soprattutto dopo le precipitazioni. Solitamente, le buche sono la conseguenza finale della rottura per fatica della pavimentazione, provocata dall'asportazione progressiva del materiale bituminoso a seguito del continuo passaggio dei veicoli. Il degrado peggiora in assenza di manutenzione, a causa di difetti nella compattazione degli strati sottostanti o per un'eccessiva evoluzione di fessurazioni a ragnatela. Se attraversate ad alta velocità, possono causare danni significativi ai veicoli.



*Figura 18 - Buca*



*Figura 19 - Buca*

12. Rigonfiamenti (swell): sono un'elevazione della superficie stradale (Fig.20) e sono risultati di aree che si gelano negli strati inferiori. Interessando tipicamente più di 3 metri, sono in genere accompagnati da fessurazioni di scorrimento.



*Figura 20 - Rigonfiamento*

13. Scalinamento (lane/shoulder drop-off): differenza di livello tra la superficie stradale percorsa dai veicoli e il bordo esterno della banchina (Fig.21,22). Talvolta, si può riscontrare anche un dislivello tra le corsie, dovuto a irregolarità nella fase di costruzione della pavimentazione. Tuttavia, la causa più comune è il progressivo deterioramento e sgretolamento della banchina.



*Figura 21 - Scalramento*



*Figura 22 - Scalramento*

14. Spostamento del manto per spinta orizzontale (Shoving): Questa deformazione longitudinale (Fig.23) si manifesta in zone circoscritte della pavimentazione, solitamente dove la miscela entra in contatto con un elemento rigido. Il passaggio dei veicoli genera sollecitazioni che danno origine a piccole ondulazioni sulla superficie. Tale fenomeno si verifica prevalentemente a causa di errori nella produzione del conglomerato, che risulta eccessivamente fluido.



*Figura 23 – Spostamento del manto per spinta orizzontale*

15. Essudazione di bitume (bleeding): si ritrova una superficie lucida e riflettente (Fig.24), che diventa appiccicosa quando asciutta e scivolosa in condizioni di bagnato, per via di un eccesso di bitume nella miscela. Questo fenomeno è principalmente causato dall'aumento della temperatura



superficiale dovuto all'esposizione solare: il calore incrementa la viscosità del bitume, favorendo il suo spostamento all'interno della miscela. Il bitume, riempiendo i vuoti e raggiungendo la superficie, si accumula nel tempo, poiché il processo non si inverte durante i periodi più freddi o di minor traffico. Tra le cause possibili figurano una progettazione errata della miscela, un eccesso di legante bituminoso in fase di stesura o un contenuto insufficiente di vuoti d'aria.



*Figura 24 – Essudazione di bitume*

16. Levigatura dell'aggregato (polished aggregate): si tratta di aree in cui la quantità di aggregato sopra il legante è ridotta o manca completamente di particelle ruvide o spigolose (Fig.25), con conseguente diminuzione di aderenza. Questo è causato dalla continua azione dei veicoli in transito che levigano l'aggregato, e con il tempo, infatti, le particelle spigolose tendono a smussarsi. Questo processo di usura è più rapido quando l'aggregato è particolarmente suscettibile all'abrasione.



*Figura 25 – Levigatura aggregato*

17. Scagliatura della superficie (raveling): si tratta di una disintegrazione progressiva dello strato superficiale causata dall'usura, si verifica quando la miscela non è prodotta correttamente o a seguito del suo indurimento. In queste circostanze, si può verificare la perdita di aggregati fini o grossolani, che vengono poi rimossi dal traffico (Fig.26,27). La separazione tra gli inerti e il legante bituminoso può essere dovuta all'ossidazione del legante, a una incorretta compattazione durante la costruzione, alla presenza di polvere sulle particelle di aggregato (che fa sì che il legante si leghi alla polvere invece che all'aggregato), o a spostamenti meccanici provocati da certi tipi di traffico (come pneumatici chiodati, spazzaneve o veicoli cingolati). Conseguenze di questo fenomeno sono detriti sui marciapiedi, superficie irregolare, accumulo di acqua con rischio di aquaplaning e perdita

di resistenza allo slittamento. In alcuni casi, la separazione tra gli aggregati e il legante bituminoso può iniziare negli strati inferiori e progredire verso l'alto, un fenomeno noto come “stripping”, e comporta una riduzione del supporto strutturale e la formazione di solchi, ondulazioni, sfilacciate o fessurazioni. Lo stripping è difficile da individuare, poiché si manifesta sulla superficie come altre forme di deterioramento, e per identificare il problema è necessario prelevare un campione di pavimentazione.



*Figura 26 – Scagliatura della superficie*



*Figura 27 – Scagliatura della superficie*

18. Rattoppi (patching-utility cut patching): sono aree ricoperte per sistemare dissesti precedenti (Fig.28). Risulta un ammaloramento anch'esso poiché non restituisce alla pavimentazione le proprietà originarie. Il rattoppo lo si trova per sistemare deterioramenti pregressi localizzati o per lavori legati ai sottoservizi (rete elettrica o idraulica).



*Figura 28 - Rattoppi*

19. Essudazione di acqua e pompaggio (water bleeding and pump): si verifica quando l'acqua fuoriesce da giunti, fessure o da uno strato particolarmente poroso. L'acqua, insieme al materiale sottostante, può essere espulsa (pompaggio) attraverso le fessure o dai lati dello strato bituminoso a causa dei carichi mobili cui è sottoposto (Fig.29). Tale situazione indica un'elevata porosità della pavimentazione e comporta una riduzione del supporto strutturale (soprattutto in caso di pompaggio). Le principali cause di questo problema includono una compattazione inadeguata durante la costruzione, una progettazione errata della miscela, un'alta falda freatica o un drenaggio inefficace.



*Figura 29 – Essudazione di acqua*

20. Attraversamento binari (railroad crossing): con questo si indicano le irregolarità adiacenti alla fascia dove sono presenti i binari, che son causati dall'attraversamento.





*Figura 30 – Attraversamento binari*



*Figura 31 – Attraversamento binari*

Si ricorda che la pavimentazione è tipicamente soggetta a uno stress causato da più fattori combinati, raramente è riconducibile ad una sola condizione prevalente.

### 1.3 INDIVIDUAZIONE DEI DISSESTI

La regolarità delle pavimentazioni è un aspetto fondamentale nella percezione della qualità della strada da parte degli utenti. Essa influisce direttamente sul comfort di guida, riducendo l'affaticamento del conducente e dei passeggeri, e sui costi operativi, incidendo su consumo di carburante, usura degli pneumatici, manutenzione dei veicoli e tempi di percorrenza. Inoltre, ha un impatto significativo sulla sicurezza stradale, influenzando sulla stabilità e il comportamento dinamico dei veicoli.

Per definire la regolarità di una pavimentazione, è necessario introdurre il concetto di profilo superficiale, riferendosi alla rappresentazione della deviazione verticale di una pavimentazione rispetto a un piano orizzontale di riferimento, misurata lungo una direzione predefinita, generalmente longitudinale o trasversale (Fig.32).

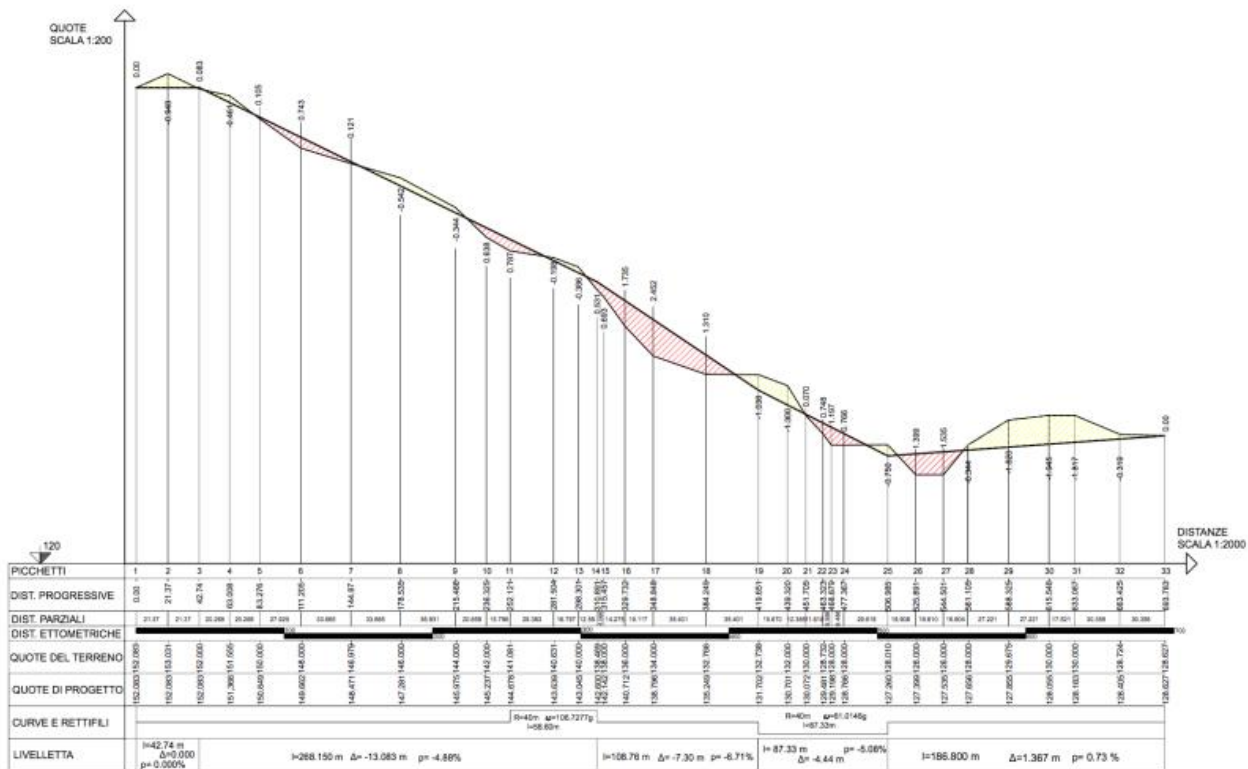


Figura 32 – Esempio profilo longitudinale stradale

Analiticamente, il profilo superficiale si considera come una sovrapposizione di onde casuali con ampiezze variabili, e si ritiene regolare per un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 0,5 e 50 metri.

Le irregolarità di una pavimentazione possono derivare da diversi fattori, tra cui i carichi di traffico, le condizioni ambientali, le caratteristiche dei materiali utilizzati nella costruzione e difetti di posa in opera. In generale, le irregolarità con lunghezze d'onda più brevi sono associate a difetti localizzati, come depressioni, buche, fessurazioni e corrugamenti. Al contrario, quelle con lunghezze d'onda maggiori sono solitamente causate da fenomeni ambientali combinati con le caratteristiche della pavimentazione, ad esempio il consolidamento non uniforme del sottofondo, i cicli di gelo e disgelo o l'espansione di terreni argillosi, traducendosi ad esempio in ondulazioni, rigonfiamenti o avvallamenti.

### 1.3.1 Rilievo profilo

Il rilievo delle eventuali irregolarità delle pavimentazioni stradali si basa su due principali metodologie: la misurazione diretta del profilo superficiale della pavimentazione e la valutazione della risposta di veicoli strumentati. Tuttavia, quest'ultima tecnica presenta problemi di ripetibilità, poiché i risultati variano in base al veicolo utilizzato e alle sue caratteristiche nel tempo. Per questo motivo, si preferiscono metodi basati sul rilievo del profilo superficiale, che garantiscono misurazioni più affidabili grazie alla modellazione matematica della tessitura della pavimentazione misurata.

Esistono diverse tecnologie per effettuare tali rilievi:

- ❖ Metodi manuali
  - Stadia e livello (Fig.33): il sistema più semplice, con misurazioni a intervalli non superiori a 25 cm. Risulta però un metodo lento e adatto solo per brevi tratti

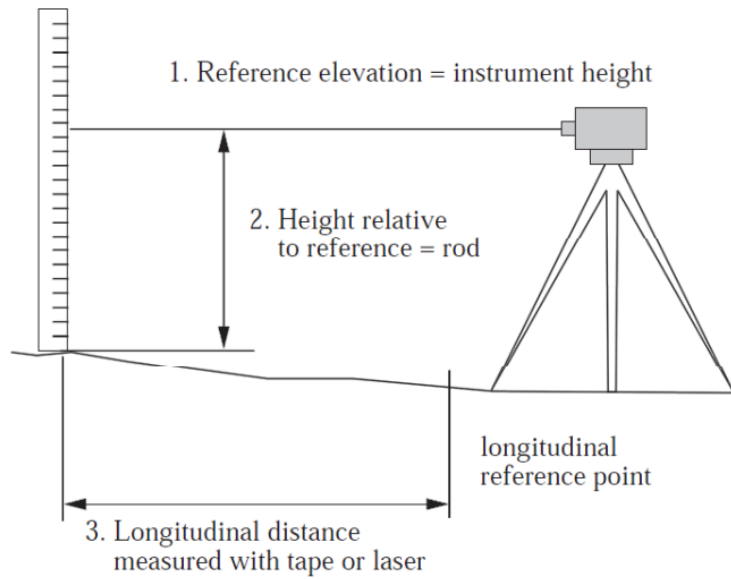


Figura 33 – Schema stadia e livello

- Dipstick (Fig.34): impiegato negli Stati Uniti, utilizza un inclinometro per registrare in automatico l'altezza relativa tra due punti distanziati di 30 cm. Sebbene garantisca precisione, è adatto solo a sezioni stradali limitate, con una capacità massima di 250 m/h;



Figura 34 – Esempio Dipstick

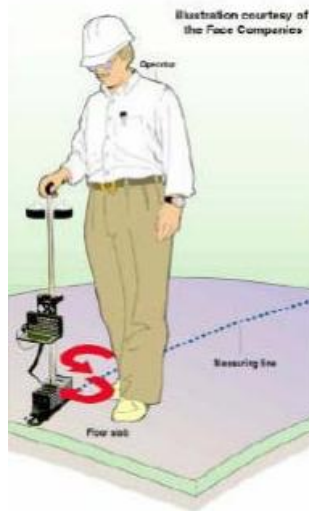


Figura 35 – Esempio modo d'uso Dipstick

- ❖ Profilometri inerziali (installati su veicoli in movimento, utilizzano accelerometri per rilevare gli spostamenti verticali e sensori ottici, laser o a ultrasuoni per misurare la distanza tra il veicolo e la superficie stradale; questo sistema permette di acquisire dati a velocità di traffico normale, minimizzando le interruzioni alla circolazione, ma richiede molta esperienza da parte dell'utilizzatore)
  - APL (analizzatore del profilo longitudinale) (Fig.36): utilizzato in Francia, sfrutta un carrello strumentato trainato con una o due ruote utilizzate per misurare il profilo della pavimentazione in base agli spostamenti verticali della/e stessa/e rispetto alla velocità del veicolo. Può operare a velocità variabili tra 20 e 140 km/h a seconda dell'applicazione (controlli locali, analisi stradali, rilievi aeroportuali), e rileva irregolarità verticali fino a 100 mm, con lunghezze d'onda comprese tra 1 e 20 m o tra 1 e 50 m in base alla velocità;

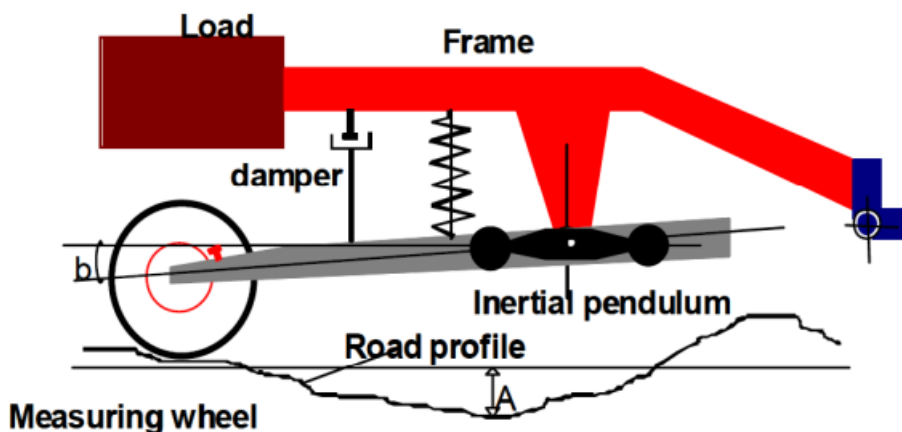


Figura 36 – Schema APL

- RST (Road Surface Tester) (Fig.37): svedese, questo impiega una barra trasversale con 11 sensori laser montata anteriormente a un veicolo, attrezzato per elaborare e registrare i dati, misurando il profilo longitudinale con 2 di essi ( $3^\circ$  e  $9^\circ$ ) e altri parametri stradali, tra cui il profilo trasversale, e infine, un ulteriore dispositivo è in grado di misurare la velocità;

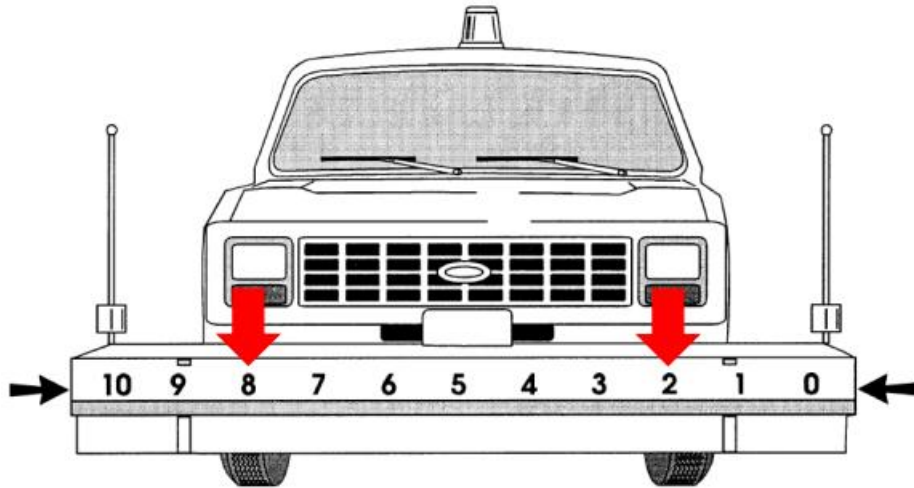


Figura 37 – Schema RST

- ARAN (Automatic Road Analyzer) (Fig.38): concepito in Canada, non solo rileva il profilo longitudinale, ma analizza anche parametri come il raggio di curvatura, la pendenza e la presenza di fessurazioni con relativa estensione. L'acquisizione del profilo longitudinale si basa su due accelerometri installati sul telaio e sull'asse posteriore del veicolo



Figura 38 – Veicolo attrezzato ARAN

- TRRL (Transport and Road Research Laboratory) (Fig.39): profilometro laser sviluppato nel Regno Unito, utilizza quattro sensori laser su un carrello trainato per acquisire misurazioni ripetute nel tempo, restituendo il profilo della pavimentazione con elevata precisione

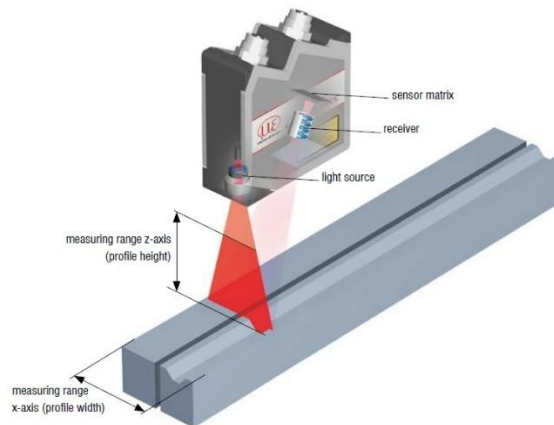


Figura 39 – Schema esempio di profilometro laser

- Profilmatic (Fig.40): sviluppato dal Politecnico di Torino, permette di valutare contemporaneamente la regolarità del profilo longitudinale e il comfort percepito dai conducenti, grazie a un sistema di accelerometri e telemetri laser montati su un veicolo.



Figura 40 – Attrezzatura profilmatic montata sul veicolo

### 1.3.2 Validità delle misurazioni e analisi della pavimentazione: gli indici di stato

Un profilometro è considerato affidabile quando fornisce misurazioni strettamente correlate al profilo reale della pavimentazione. Questo si verifica quando i dati ottenuti mostrano una correlazione statistica coerente, ad esempio con il parametro IRI (International Roughness Index). Se l'apparecchiatura è adeguata, i risultati ottenuti non necessitano di conversioni o correzioni aggiuntive.

L'IRI è il risultato dell'International Road Roughness Experiment (IRRE) condotto nel 1982 in Brasile, coinvolgendo Paesi come Francia, Stati Uniti, Belgio e Inghilterra, al fine di trovare un unico metro di scambio delle informazioni di irregolarità che fosse valido internazionalmente.

Il criterio alla base della definizione dell'IRI ha consentito di superare i problemi di riproducibilità e stabilità dei risultati nel tempo. Ciò è stato possibile grazie alla possibilità di calcolarlo considerando dati acquisiti con tutte le apparecchiature all'epoca esistenti e all'adozione di una trasformazione matematica applicata a un profilo digitale misurato.

Operativamente, l'IRI è calcolato seguendo diverse fasi:

- L'IRI è riferito a un singolo profilo longitudinale, quindi i sistemi che rilevano più profili simultaneamente restituiscono valori di IRI indipendenti. Il rilievo del profilo deve avvenire con un intervallo di campionamento "D" inferiore a 167 mm e con una risoluzione tarata in base alla regolarità della pavimentazione, generalmente pari a 0,5 mm in assenza di specifiche esigenze;
- Tra due punti rilevati, il profilo è considerato a pendenza costante;
- Per simulare l'adattamento degli pneumatici al profilo nell'area d'impronta e rendere l'algoritmo di calcolo indipendente dal valore di "D", il profilo viene smussato applicando un filtro a media mobile ponendo come lunghezza base  $D = 250$  mm;
- Il profilo smussato viene successivamente filtrato tramite il modello Quarter-Car Simulation (QCS), che utilizza parametri riferiti a un veicolo standardizzato, denominato Golden Car, con velocità simulata di 80 km/h per via del fatto che a questa velocità l'IRI è sensibile alle stesse lunghezze d'onda che generano vibrazioni nei veicoli stradali in condizioni medie di utilizzo.
- Il valore dell'IRI si ottiene dividendo la somma dei movimenti assoluti della sospensione ottenuta tramite modello QCS, per la lunghezza del profilo. Il risultato è espresso come pendenza, solitamente m/km o mm/m.

Si individuano (Fig.41):

- Per  $0 < \text{IRI} < 2$ , aeroporti e autostrade;
- Per  $1,5 < \text{IRI} < 3,5$ , nuove pavimentazioni;
- Per  $2,5 < \text{IRI} < 6$ , vecchie pavimentazioni;
- Per  $3,5 < \text{IRI} < 10$ , pavimentazioni non legate regolari;
- Per  $4 < \text{IRI} < 11$ , pavimentazioni dissestate;
- Per  $\text{IRI} > 8$ , pavimentazioni non legate irregolari;

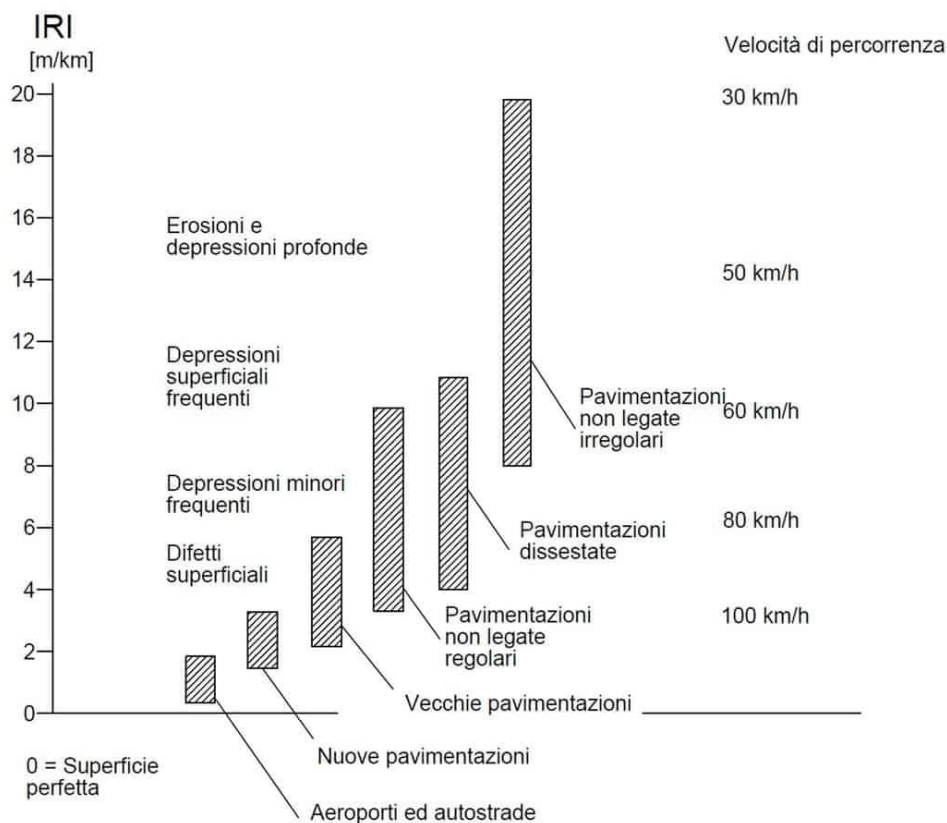


Figura 41 – Valori tipici dell'IRI

Quando i metodi più sofisticati non sono utilizzabili, è possibile stimare approssimativamente l'irregolarità di una strada attraverso valutazioni soggettive. Questo approccio risulta utile per accertamenti preliminari o in situazioni in cui non si dispone di strumentazioni sofisticate. Il metodo si basa sulla descrizione delle condizioni della superficie stradale e sulle sensazioni percepite durante la guida di un veicolo.

Oltre alle ispezioni visive, un rilievo fotografico può supportare efficacemente la valutazione. Tuttavia, mentre le immagini possono enfatizzare alcuni difetti della carreggiata, tendono a ridurre la percezione delle variazioni del profilo stradale, rischiando di risultare fuorvianti. L'affidabilità di questa metodologia dipende prettamente dall'esperienza dell'osservatore: operatori esperti riescono solitamente a stimare lo stato della pavimentazione con un'accuratezza compresa tra 2 e 3 m/km, mentre osservatori meno esperti possono commettere errori più ampi, tra 2 e 6 m/km. Per questo motivo, le stime dell'IRI ottenute con questo metodo risultano piuttosto approssimative e, quando possibile, dovrebbero essere sostituite da strumenti meccanici e procedure più precise.

Le scale di misura dell'IRI basate su valutazioni soggettive sono illustrate nelle Fig. 42,43 seguenti.



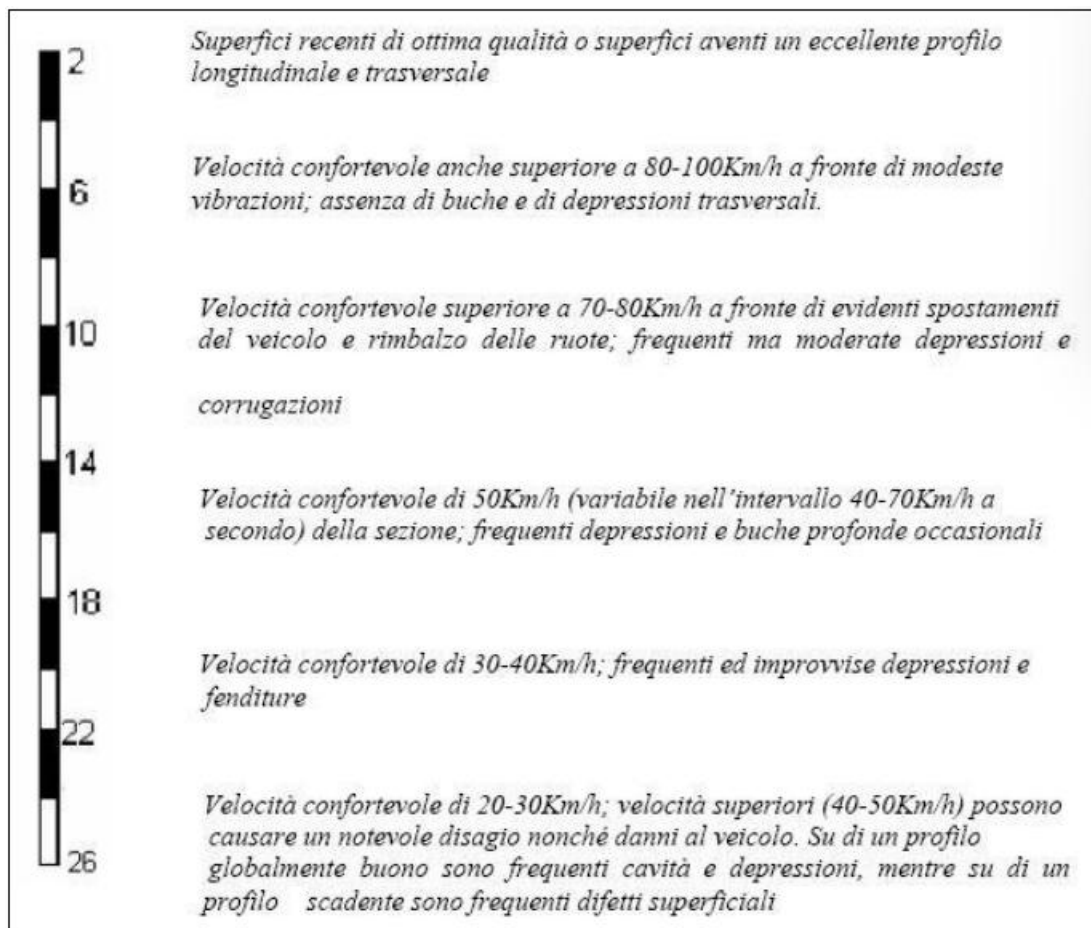


Figura 42 – Scala per la stima soggettiva dell'irregolarità di strade pavimentate

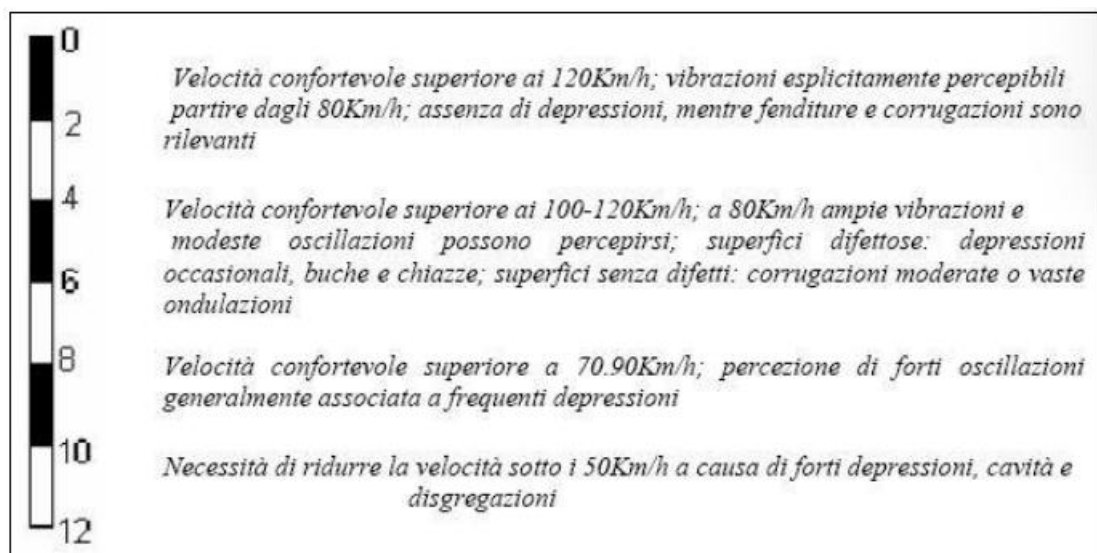


Figura 43 – Scala per la stima soggettiva dell'irregolarità di strade non pavimentate

Dall'analisi dei due abachi emerge che i principali parametri discriminanti per la valutazione dell'irregolarità sono:

- La velocità massima sostenibile senza provocare sensazioni di disagio.

- La frequenza e l'intensità delle oscillazioni e vibrazioni percepite.
- La presenza di difetti superficiali, quali:
  - Buche: aperture nella pavimentazione causate da disintegrazione e perdita di materiale, con diametro superiore a 250 mm e profondità maggiore di 50 mm.
  - Fenditure: crepe sottili e allungate lungo la superficie stradale.
  - Chiazze: macchie di forme e dimensioni variabili, indicative di un'eterogeneità del manto stradale.

Secondo questo approccio, la scala di irregolarità può raggiungere valori di IRI fino a 24 m/km. Sebbene il comfort di viaggio vari in base al tipo di veicolo, un osservatore esperto dovrebbe essere in grado di calibrare la propria percezione e sensibilità in funzione del mezzo utilizzato.

La stima dell'IRI dovrebbe essere effettuata su intervalli di 1 km, circa ogni 50-70 secondi a una velocità di circa 60 km/h. In alternativa, lungo tratti stradali visivamente uniformi, è possibile adottare intervalli più ampi, compresi tra 2 e 5 km. In ogni caso, il numero di segmenti su cui valutare l'irregolarità dipende dal livello di dettaglio richiesto per l'analisi.

### 1.3.3 Altri indici di irregolarità

Vi sono altri indicatori che quantificano lo stato di ammaloramento della pavimentazione stradale, alcuni si basano sull'osservazione diretta della condizione in cui verge il piano viabile, altri, più simili all'IRI, derivano da un'analisi basata sul rilievo del profilo longitudinale, infine ve ne sono anche derivanti dall'output di sistemi di misura appositi. Per ciascun indicatore sarà riportata anche la sua correlazione con l'IRI e, nel caso sia presente, la precisione di quest'ultima indicata dal valore  $R^2$ .

#### **Present Serviceability Index (PSI)**

Il PSI è un parametro utilizzato dalla AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) per la progettazione delle pavimentazioni, rappresentativo dello stato di degrado della superficie stradale. Esso misura la capacità di un tratto di pavimentazione di servire il traffico nelle condizioni attuali, basandosi sul livello di ammaloramento, valutato attraverso diversi valori, tra cui:

- Variazioni di pendenza del profilo longitudinale (SV);
- Profondità delle ormaie ( $R_D$ );
- Superficie delle buche (P);
- Aree con lesioni (C).

Il PSI viene espresso su una scala da 0 a 5, dove un valore 0 indica una strada in pessime condizioni, impraticabile per la guida, viceversa un valore 5 corrisponde a una pavimentazione in condizioni ottimali, ideale per la circolazione dei veicoli.

Il PSI fornisce un giudizio basato su un'analisi oggettiva degli ammaloramenti, e le sue espressioni analitiche variano in funzione del tipo di pavimentazione, distinguendo tra pavimentazioni rigide (calcestruzzo) e pavimentazioni flessibili (conglomerato bituminoso).

Rispettivamente le espressioni sono:

$$PSI = 5,41 - 1,78 * \log_{10}(1 + SV) - 0,09 * \sqrt{(C + P)}$$

$$PSI = 5,03 - 1,91 * \log_{10}(1 + SV) - 1,38 * R_D^2 - 0,01 * \sqrt{(C + P)}$$

Si individua un valore minimo di utilità che un automobilista può tollerare prima che si renda necessaria la manutenzione della pavimentazione, definito "prestazione terminale" e indicato come "Pt", ovvero PSI terminale. Tipicamente i valori assunti dal Pt sono:

- Pt = 2,5 per le strade principali,
- Pt = 2 per le strade secondarie.

Le pavimentazioni nuove presentano generalmente uno PSI compreso tra 4 e 4,5, mentre se questo risulta tra 2 e 2,5 vi è la necessità di un intervento manutentivo adeguato.

Sperimentalmente, tramite metodologie statistiche, è stata individuata una correlazione tra il PSI e il numero di passaggi di determinati assi, che ha permesso di quantificare l'impatto della fatica intesa come il numero di ripetizioni dei carichi, sulla vita utile delle pavimentazioni stradali. L'evoluzione dell'idoneità della strada in funzione del numero "N" di passaggi degli assi è descritta da una relazione del tipo:

$$PSI = PSI_{iniz} - A * \left(\frac{N}{\rho}\right)^\beta$$

In cui "A" è una costante e rappresenta la differenza tra lo PSI iniziale e quello presente quando si ritiene necessario un intervento di ricostruzione (grave ammaloramento stradale);  $\rho$  e  $\beta$  sono parametri dipendenti dai carichi degli assi e dalle caratteristiche della pavimentazione, quali spessori e materiali degli strati.

Vi sono 2 relazioni che legano il PSI all'indice IRI:

- Paterson (1987):

$$IRI = 5,5 * \ln\left(\frac{5}{PSI}\right)$$

- Bertrand, Harrison e Mc Cullough (1990):

$$IRI = 577,42 - 222,17 * PSI + 25,664 * PSI^2 \quad (R^2 = 0,997)$$

### **Riding Comfort Index (RCI)**

L'RCI è un indice che misura la regolarità di una strada su una scala da 0 a 10, rappresentando il livello di comfort di guida percepito durante la percorrenza.

Questa scala di qualità di viaggio è stata definita attraverso un'analisi statistica basata sui punteggi, da 0 a 10, assegnati da un campione di persone con diverse esperienze (tecnici stradali e utenti comuni). Tali valutazioni sono state applicate a circa 40 tratti stradali con condizioni variabili (da ottime a pessime) e confrontate con il valore di accelerazione efficace, misurato tramite un accelerometro montato sull'asse posteriore di un veicolo di prova.

L'accelerazione efficace indica l'ampiezza delle oscillazioni subite dal veicolo, ed è funzione dell'accelerazione verticale. Il parametro RCI è funzione delle accelerazioni efficaci indotte sul veicolo.

I valori limite dell'RCI secondo le norme tecniche di settore risultano:

- RCI > 7,5: regolarità buona
- RCI < 5,0: regolarità mediocre
- RCI < 3,5: regolarità scarsa (presenza di evidenti fessurazioni e ormaie profonde)

L'RCI, tuttavia, non fornisce informazioni dettagliate sull'ammaloramento locale, per cui alcuni tratti potrebbero richiedere ulteriori indagini per individuare le zone dove è necessario intervenire puntualmente.

La correlazione tra RCI e IRI, sviluppata dal British Columbia Roadway Pavement Management System (RPMA), risulta:

$$IRI = 5,588 - 0,578 * RCI$$

### **Ride Number (RN)**

Sviluppato da Sayers e Karamihas nel 1996, significa "numero associato alla percorrenza", e deriva da un'analisi matematica del rilievo del profilo longitudinale che produce una stima soggettiva della qualità di viaggio. Questo indice si basa su un algoritmo ideato dal National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), e si ricava tramite l'utilizzo del Profile Index (PI) tramite:

$$RN = 5 * e^{-160*PI}$$

Il RN è stato sviluppato con l'obiettivo di essere indipendente dall'intervallo di misurazione del profilo (step), garantendo misurazioni dell'irregolarità stradale coerenti, anche se ottenute con apparecchiature diverse. Inoltre, consente la formulazione di algoritmi di correlazione con altri indicatori dello stato della pavimentazione.

L'indice varia da 0 a 5, in modo simile a quella del PSI.

La correlazione tra IRI e RN, ottenuta dal NCHRP, risulta:

$$IRI = 563982,18e^{-1,51RN}$$

### **Profile Index (PI)**

Tradotto "indice di profilo", questo indice quantifica la variazione totale del profilo stradale rispetto a un piano ideale medio, espressa in m/km.

Si presentano due casi, nel primo, quando la misurazione avviene lungo una singola traccia seguita dallo pneumatico durante il transito (wheeltrack), il valore del PI viene determinato direttamente. Altrimenti, se si dispongono di dati relativi all'irregolarità di entrambe le tracce delle ruote, il PI complessivo si ottiene mediante la media riportata di seguito:

$$PI = \sqrt{\frac{PI_R^2 + PI_L^2}{2}}$$

dove  $PI_R$  e  $PI_L$  rappresentano i valori quadratici medi del PI lungo la traccia destra e sinistra (right e left).

Il PI viene poi convertito nel RN attraverso la relazione già precedentemente riportata

$$RN = 5 * e^{-160*PI}$$

Esistono 3 diverse correlazioni tra IRI e PI, che si riportano di seguito:

- Kombe e Kaleva (1992):

$$IRI = 52,9 + 6 * PI \quad (R^2 = 0,93)$$

$$IRI = 73,7 + 2,83 * PI \quad (R^2 = 0,92)$$

- Kulakowski e Wambold (1989):

$$IRI = 36,4 + 3,11 * PI \quad (R^2 = 0,56)$$

### Mays Ride Number (MRN)

Questo indice deriva dall'uso del Ride Mays Meter, un veicolo progettato per rilevare la regolarità stradale tramite un sistema RTRRMS (Response Type Road Roughness Measurement System), come gli altri visti in precedenza.

Il sistema impiega una serie di trasduttori per registrare le condizioni della pavimentazione, calcolando il MRN come il rapporto tra il dislocamento complessivo subito dall'asse del veicolo e la lunghezza del tratto stradale analizzato.

Poiché il MRN è il risultato di un sistema RTRRMS, la sua ripetibilità e accuratezza sono influenzate da diversi fattori connessi alle caratteristiche del veicolo, tra cui:

- Condizioni di carico
- Pressione degli pneumatici
- Efficienza degli ammortizzatori
- Attrito tra ruota e superficie stradale

Una formulazione alternativa del MRN è stata proposta nel 1980 da Gillespie, Sayers e Segal (1980), che lo definiscono come il prodotto tra l'ARV (Average Rectified Velocity) dell'asse e il tempo necessario per percorrere 1 miglio (1,6 km) a una velocità di prova prefissata.

La correlazione individuata tra IRI e MRN, formulata da Butrand, Harrison e McCullough (1990) è la seguente:

$$IRI = 61,426 + 0,83577 * MRN \quad (R^2 = 0,997)$$

### Indice della Normativa Svizzera I<sub>1</sub>

Quest'indice, presente nella Normativa Svizzera SNV 640925, classifica la condizione della superficie stradale variando tra 0 e 5, rispettivamente degrado nullo e condizione peggiore possibile.

Viene calcolato a partire dall'osservazione dei dissesti, che son classificati come:

- Scivolosità della superficie;
- Degrado del rivestimento (sgranamento, distacchi superficiali, buche, fessure);
- Deformazioni del rivestimento (avvallamenti, corrugamenti, ormaie);
- Degrado strutturale (fessurazioni longitudinali, a ragnatela, sollevamenti);
- Degrado dei rattoppi.

L'indice è calcolato tramite le seguenti equazioni:

- Se  $\sum(G_i * M_i) \leq 50$  allora  $I_1 = \frac{\sum(G_i * M_i)}{10}$
- Se  $\sum(G_i * M_i) > 50$  allora  $I_1 = 5$

In cui  $M_i$ =peso ponderale attribuito a ogni categoria di dissesto (Tab.1) e  $G_i$ =gravità ed estensione dell'ammaloramento (Tab. 2,3,4).

Si suddivide poi come segue:

- $0 \leq I_1 < 1$  buono;
- $1 \leq I_1 < 2$  medio;
- $2 \leq I_1 < 3$  sufficiente;
- $3 \leq I_1 < 4$  critico;
- $4 \leq I_1 < 5$  pessimo;

Tabella 1 – Valori di  $M_i$  da assegnare a ciascuna categoria di degrado superficiale (SN 640925)

Categoria di degrado	Peso ponderale
Scivolosità della superficie	2
Degradi del rivestimento	2
Deformazioni del rivestimento	2
Degradi strutturali	3
Degradi delle riparazioni	1

Tabella 2 - Valori di  $G_i$  in funzione della classe di severità ed estensione (SN 640925)

Severità	Estensione			
	0	1	2	3
1	0	1	2	3
2	0	2	4	6
3	0	3	6	9

Tabella 3 – Definizione classi di severità e di estensione (SN 640925)

Classe di severità	Severità del degrado superficiale
1	Degrado lieve
2	Degrado medio
3	Degrado severo

Tabella 4 – Definizione classi di severità e di estensione (SN 640925)

Classe di estensione	Estensione	Percentuale dell'area totale interessata dal degrado
0	Nessun degrado	0
1	Degrado molto localizzato	<10%
2	Degrado da localizzato a esteso	Dal 10% al 50%
3	Degrado molto esteso	>50%

### Pavement Condition Index (PCI)

Esso risulta essere un indicatore oggettivo dello stato di degrado complessivo della pavimentazione, come suggerisce il nome, ed è adoperato in ASTM D6433-03.

Il calcolo del PCI si basa su ispezioni visive dirette, durante le quali ogni tipo di degrado viene classificato secondo un formato predefinito che include:

- Posizione all'interno della sezione
- Dimensione del difetto
- Grado di severità
- Quantità dell'anomalia

I dati raccolti vengono successivamente elaborati attraverso un algoritmo specifico, che applica relazioni diverse in base alla tipologia di degrado rilevata.

Il PCI è espresso su una scala da 0 a 100, dove 0 indica condizioni pessime della pavimentazione, mentre 100 corrisponde a condizioni eccellenti, ed è divisa in 7 categorie (Fig.44).

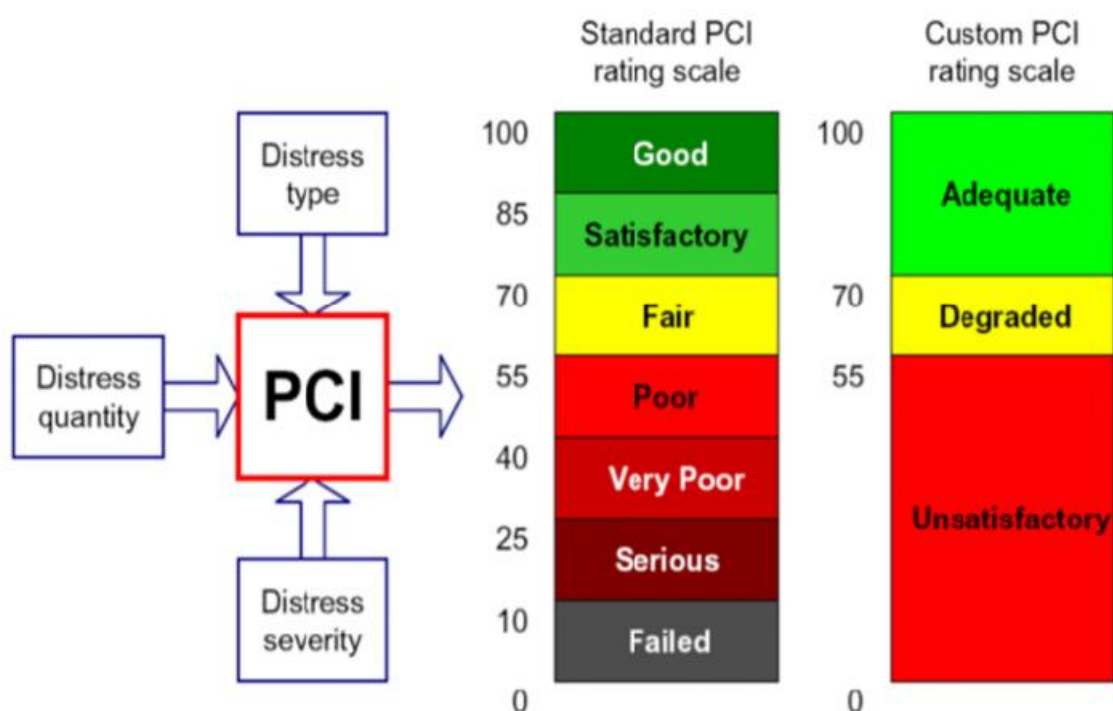


Figura 44 – Standard PCI definito dalla norma ASTM D6433-11, con i colori associativi

A ciascuna categoria è associata una specifica strategia manutentiva, finalizzata a preservare o ripristinare la funzionalità della pavimentazione. La Tabella 5 seguente riporta in breve un giudizio qualitativo relativo alle condizioni della strada e la tipologia di intervento consigliata in base al PCI.

Tabella 5 – Giudizio qualitativo e interventi manutentivi suggeriti in base al PCI

CATEGORIA	PCI	INTERVENTI DI MANUTENZIONE E GIUDIZIO SINTETICO QUALITATIVO
1	85-100	Interventi di routine o a carattere preventivo. Poche o nessuna anomalia per PCI compresi tra 90 e 100, piccole fessure o sfaldamenti superficiali per valori tra 75 e 89.
2	70-85	
3	55-70	Interventi a carattere riabilitativo. Adeguata qualità di viaggio, anomalie contenute, ma processo di deterioramento avviato per valori di PCI tra 60 e 74.
4	40-55	Pavimentazioni deteriorate e qualità di viaggio inferiore allo standard offerto dalla categoria della pavimentazione per valori tra 45 e 59.
5	25-40	Interventi di maggior riabilitazione o ricostruzione. Grosse anomalie, limitata velocità di flusso del traffico.
6	10-25	Interventi di ricostruzione. Le condizioni della pavimentazione rendono difficoltosa la marcia del veicolo.
7	0-10	

Nel documento "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys" (ASTM D6433-03) viene descritto il metodo per la determinazione del PCI.

L'analisi inizia con la scansione del tratto stradale tramite telecamere laser di tipo Laser Crack Measurement System (LCMS), montate su un veicolo (Fig.45). Questi sensori acquisiscono immagini e dati dettagliati sulla superficie della pavimentazione.

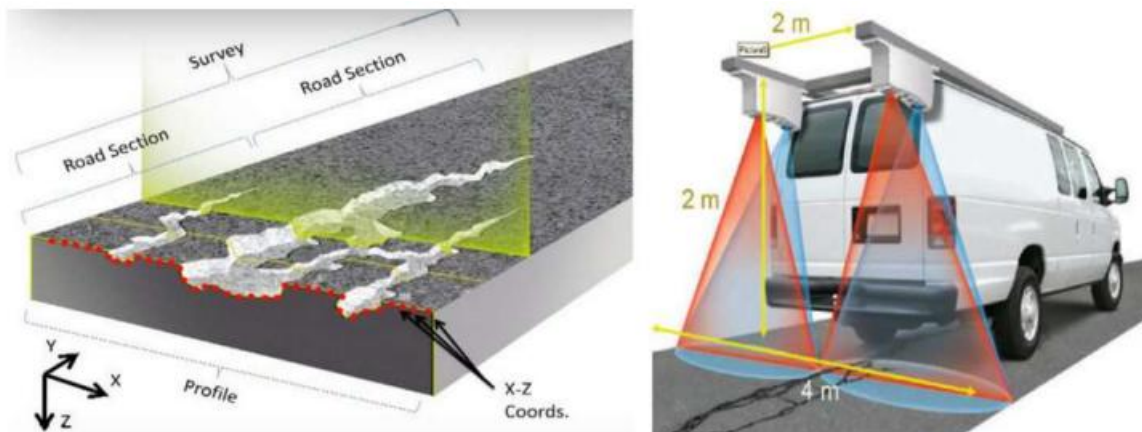


Figura 45 – Esempio di un rilievo

Le informazioni raccolte vengono successivamente processate da algoritmi specifici, i quali analizzano le anomalie presenti nel tratto esaminato, classificandole in base a tipologia del dissesto e grado di severità del danno.

Un operatore specializzato supervisiona l'elaborazione dei dati, garantendo un'immediata valutazione dello stato della pavimentazione, consentendo di ottimizzare la programmazione degli interventi manutentivi necessari.



## 1.4 PIANO DI MANUTENZIONE

Per ottimizzare i costi e ridurre i disagi alla circolazione, è fondamentale individuare il momento più opportuno per intervenire sulla pavimentazione stradale nel corso della sua vita utile. La scelta dell'intervento più adatto richiede esperienza e strategie operative efficaci.

Gli interventi di manutenzione stradale in Italia, secondo il Ministero delle Infrastrutture e l'ANAS, si suddividono in 3 categorie:

- Manutenzione ordinaria o preventiva → eseguita prima che si manifestino danni significativi, al fine di preservare la pavimentazione (ed esempio la sigillatura di fessurazioni superficiali);
- Manutenzione straordinaria → effettuati quando il degrado è più avanzato e richiede interventi strutturali per ripristinare le condizioni iniziali della strada (ad esempio fresatura e rifacimento degli strati di base, binder e usura);
- Interventi di potenziamento, ampliamento e/o ricostruzione → finalizzati al miglioramento qualitativo e quantitativo del patrimonio stradale, attuano modifiche e adeguamenti delle infrastrutture (ad esempio la ricostruzione di sezioni della strada quando il degrado delle sovrastrutture è tale da rendere impraticabili operazioni di recupero).

Viene poi pianificata la sequenza delle operazioni di manutenzione, per garantire un'efficace gestione del patrimonio stradale.

### 1.4.1 Fasi del Processo di Pianificazione della Manutenzione

#### 1. Definizione del budget

Ancor prima di avviare le analisi sul campo e individuare le strategie di intervento, è fondamentale stabilire il budget disponibile per la manutenzione stradale. Oggigiorno si punta sempre più sull'impiego di materiali innovativi e tecnologici per ridurre al minimo le cause di degrado.

#### 2. Valutazione dello stato della pavimentazione

Si misura il danno attraverso ispezioni visive preliminari (questo è ciò che principalmente avviene in Italia, essendo che la maggior parte degli Enti non dispone di attrezzature sofisticate come quelle precedentemente riportate al paragrafo 1.3.1), per poi attuare analisi più oggettive utilizzando gli indici di degrado per ottenere un quadro quantitativo sulle condizioni della pavimentazione. Una volta determinati questi parametri, è possibile mappare lo stato reale dell'infrastruttura, individuando le aree con maggiore degrado che necessitano di interventi urgenti.

#### 3. Selezione delle strategie di intervento

Dopo aver raccolto e analizzato i dati disponibili, si procede alla scelta degli interventi più efficaci, valutando costi e benefici di ciascuna strategia. La selezione si basa sul criterio di massima redditività, ottimizzando l'uso delle risorse economiche.

L'obiettivo finale è pianificare gli interventi di manutenzione con un ordine di priorità ben definito, garantendo sicurezza e comfort stradale. Lavorare "a regola d'arte" non solo migliora la qualità della pavimentazione ma consente anche un notevole risparmio economico nel lungo periodo.

## 1.5 SISTEMI DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE

L'Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE), ha schematizzato un Sistema di gestione ideale della rete viaria creando due sistemi, uno per le pavimentazioni (PMS=Pavement Management System) e uno per i ponti (BMS=Bridge Management System). Questi sono alla base del sistema seguito da ANAS spa in Italia.

### 1.5.1 L'organizzazione del sistema

Per strutturare un sistema di gestione efficace e organizzato, il primo passo fondamentale è l'identificazione delle strade che faranno parte della rete gestita dall'Ente. Questa fase prevede la suddivisione della rete in rami, secondo topologia e funzioni svolte, e successivamente in tronchi o sezioni basandosi sulle caratteristiche omogenee delle diverse sezioni, quali tipologia del corpo stradale (rilevato o trincea), opere d'arte (gallerie, ponti, viadotti), struttura della pavimentazione, dati storici di costruzione, traffico, dati storici degli incidenti, condizioni ambientali, stato degli elementi infrastrutturali.

I dati identificativi e le informazioni sullo stato attuale delle strade vengono raccolti in banche dati condivise con il Catasto delle Strade. Questi dati si suddividono in:

- Dati storici, che comprendono informazioni statiche di identificazione e costruzione (tipologia costruttiva, storico incidenti e manutenzioni, costi, traffico giornaliero medio annuo, parametri ambientali, ecc.);
- Dati periodici, relativi allo stato funzionale e strutturale dell'infrastruttura, ottenuti attraverso rilievi e indici di performance.

### 1.5.2 Modelli previsionali

Se le banche dati venissero integrate con sistemi di gestione avanzati, sarebbe possibile sviluppare modelli previsionali, che includono:

- Curve di decadimento, che stimano l'evoluzione dello stato dell'infrastruttura nel tempo;
- Valori soglia dei parametri di riferimento per identificare condizioni critiche;
- Cataloghi di interventi manutentivi che si prevede di fare, con criteri di selezione, specifiche tecniche, costi e benefici previsti;
- Strumenti di analisi, per la pianificazione pluriennale e la comparazione di diverse strategie di intervento.

Risulta essenziale coinvolgere gli operatori che utilizzeranno i dati e i report generati nella scelta di un sistema di gestione, affinché il sistema risulti sostenibile e funzionale rispetto all'organizzazione già esistente. Bisogna inoltre considerare:

- Costi di implementazione, manutenzione e aggiornamento degli strumenti;
- Scelta tra piattaforme standard o personalizzate;
- Integrazione con i sistemi aziendali esistenti;
- Formazione del personale per garantire un uso efficiente degli strumenti.

L'adozione di un sistema ben strutturato offre numerosi vantaggi, tra cui:

- Centralizzazione dei dati, con un'unica fonte di informazioni affidabile;
- Rappresentazione visiva della rete stradale, per una comprensione immediata;
- Supporto alle decisioni di investimento, basato su un'analisi del ciclo di vita per la valutazione delle conseguenze di diversi scenari di finanziamento;
- Monitoraggio delle prestazioni, confrontando i risultati con gli obiettivi fissati;
- Pianificazione trasparente degli interventi, rendendo i programmi di manutenzione comprensibili per tutti i soggetti coinvolti (utenti, amministratori, tecnici, fornitori);
- Ottimizzazione degli interventi manutentivi, riducendo le interruzioni alla circolazione grazie a una gestione integrata;
- Maggiore efficienza e trasparenza, grazie alla riduzione delle duplicazioni di dati e a una gestione più razionale delle risorse.

Le curve di decadimento (Fig.46) forniscono una rappresentazione della variazione nel tempo dello stato dell'infrastruttura, utilizzando metodi probabilistici o deterministici per prevedere il deterioramento e guidare gli interventi futuri.

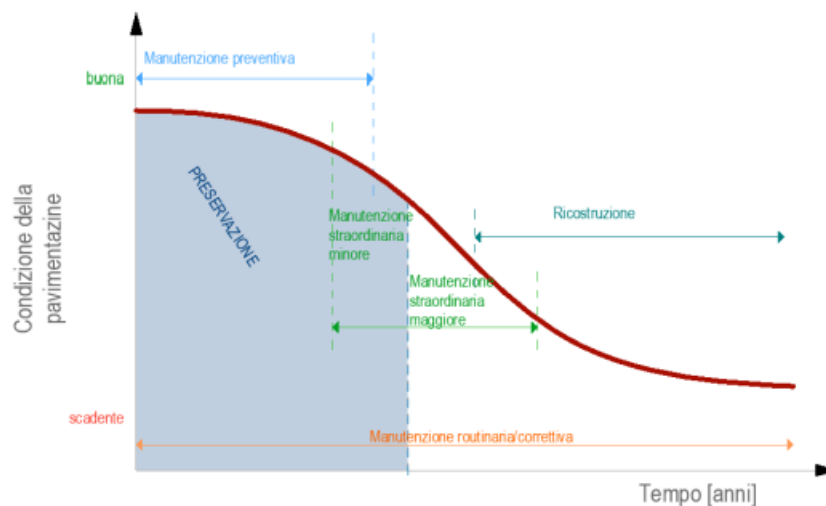


Figura 46 – Esempio di una curva di deterioramento (tratto da Santagata F. A., *Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali* vol.2, Pearson Italia, Milano, Torino, 2016)

Tramite il loro utilizzo si può individuare il momento in cui si rende necessario intervenire con un'azione manutentiva, ottimizzando i costi e riducendo i disagi cui incorrerebbe il traffico.

Attraverso l'utilizzo di queste curve, ottenibili sperimentalmente in funzione di diversi parametri come il clima, il traffico, e le caratteristiche dell'elemento, si possono individuare dei valori soglia legati all'indicatore di stato dell'infrastruttura utilizzato (Fig.47).



Figura 47 – Grafico con l'individuazione delle soglie per gli indicatori di stato (tratto da Santagata F. A., *Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali vol.2*, Pearson Italia, Milano, Torino, 2016)

I livelli principali sono:

- Livello iniziale: elemento appena costruito o recentemente ripristinato;
- Soglia di allarme: indica l'avvicinarsi della necessità di un intervento, richiedendo un monitoraggio più attento dell'evoluzione dell'indicatore;
- Soglia di intervento: livello di degrado che rende indispensabile un'azione correttiva sull'elemento
- Soglia di sicurezza: oltre questo valore, la sicurezza della circolazione non è più assicurata.

L'attività di pianificazione ha l'obiettivo di determinare, per ciascun indice di stato, la soglia di intervento ottimale tramite valutazioni tecnico-economiche specifiche per il tipo di strada, garantendo il miglior rapporto tra benefici e costi.

La pianificazione della manutenzione, come precedentemente accennato, dipende poi da un ventaglio di fattori, tra cui la disponibilità economica, il traffico, la disponibilità dei materiali, delle risorse umane e dei mezzi, dalle caratteristiche strutturali e funzionali dell'infrastruttura, etc., inoltre, è legata a tipologia, quantità e qualità dei dati e delle informazioni disponibili.

Tutto questo sarebbe la gestione ideale dell'infrastruttura, l'obiettivo finale a cui si dovrebbe aspirare.

In assenza di uno studio completo come quello sopra descritto, ci si limita a programmazioni a breve termine instaurando un ordine di priorità per ogni ramo.

In quanto tipicamente non si riesce a massimizzare sia il lato tecnico che quello economico, le strategie attuabili sono principalmente due (Fig.48):

1. Interventi meno costosi ma provvisori, che richiederanno un richiamo più ravvicinato nel tempo;
2. Interventi più costosi ma più duraturi.

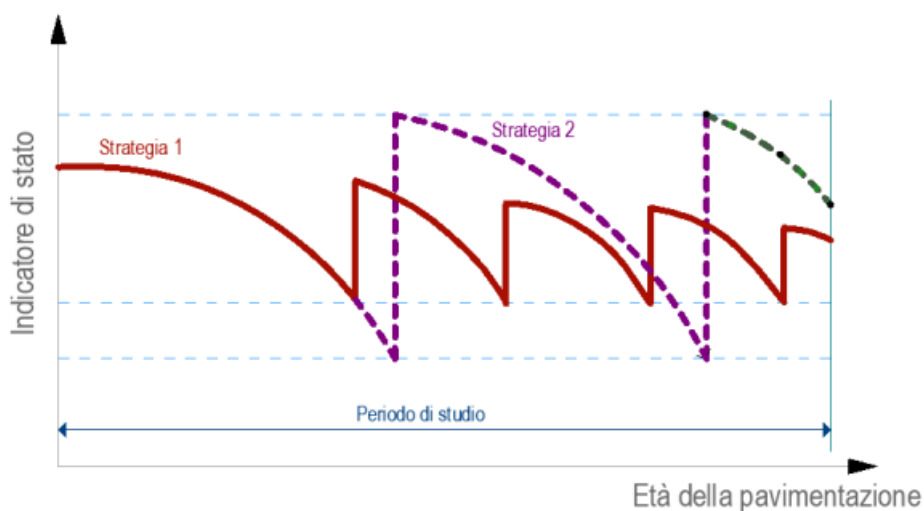


Figura 48 – Schema delle differenti strategie manutentive (tratto da Santagata F. A., *Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali vol.2*, Pearson Italia, Milano, Torino, 2016)

La scelta è generalmente basata su un'analisi economica che considera i costi di costruzione e manutenzione lungo l'intero ciclo di vita dell'infrastruttura, valutando anche i costi sociali per gli utenti e il valore residuo dell'opera al termine del suo ciclo di vita.

La vita utile di una strada varia a seconda della sua tipologia, e per valutarne la convenienza economica si utilizzano tecniche come l'analisi del Valore Attuale Netto (VAN). Questo metodo calcola la differenza tra i costi di costruzione, manutenzione e valore residuo, applicando un tasso di attualizzazione, generalmente compreso tra il 5% e il 6%, per adeguare i parametri economici al valore presente.

## 1.6 GESTIONE MANUTENZIONE IN ANAS

Quanto appena riportato sui processi di manutenzione stradale costituiscono la base teorico-operativa delle applicazioni pratiche effettivamente operate sulla rete viaria. In Italia, l'Ente più rilevante presente è l'Azienda Nazionale Autonoma delle Strade (ANAS). Le infrastrutture stradali rappresentano un asset strategico di enorme valore per il Paese, rendendo essenziale la loro conservazione.

Per ANAS, la gestione della rete stradale è vista come un processo strutturato e continuo volto ad assicurare una manutenzione efficiente, l'adattamento alle evoluzioni socioeconomiche e la sicurezza operativa delle infrastrutture. L'azienda, perciò, pianifica gli interventi di manutenzione basandosi su quattro elementi fondamentali:

- Monitoraggio e sorveglianza periodica dell'infrastruttura;
- Valutazione delle condizioni attuali dei diversi componenti;
- Previsione dell'evoluzione del degrado nel tempo;
- Definizione delle strategie di manutenzione, con identificazione degli interventi, dei relativi costi e delle tempistiche.

Schematizzabile anche come segue (Fig.49):

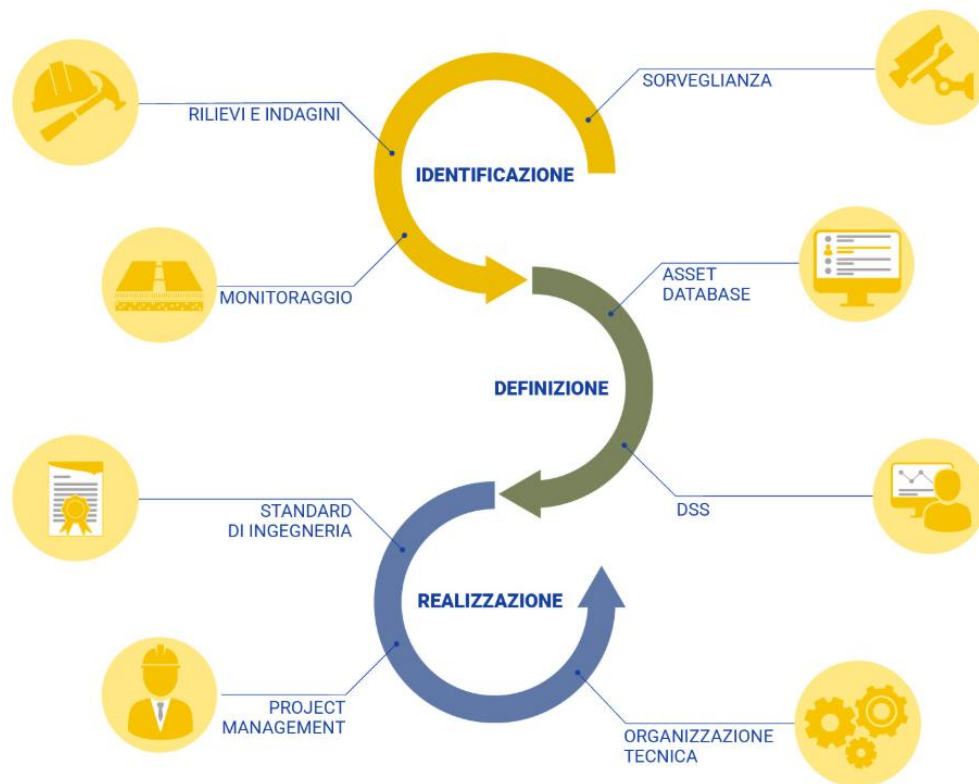


Figura 49 – Schema procedurale seguito da ANAS

L’approccio adottato è sempre più orientato alla prevenzione, rendendo imprescindibile la conoscenza dettagliata e l’aggiornamento costante dei dati relativi alle infrastrutture, consentendo di monitorare la funzionalità delle opere nel tempo e di programmare interventi basati sulle condizioni attuali e sulle previsioni di degrado.

La manutenzione programmata (MP) si propone di sostituire il modello tradizionale di manutenzione straordinaria (MS), adottando una gestione di tipo industriale. L’obiettivo è prevenire criticità, evitando di dover affrontare guasti improvvisi come eventi straordinari, e intervenire invece in modo preventivo e a intervalli regolari, riducendo il rischio di perdita di funzionalità e di danni agli utenti.

Il modello concettuale che segue ANAS per la gestione delle infrastrutture stradali, denominato Road Asset Management System (RAM), organizza tutti gli elementi dell’infrastruttura in sei macro-categorie (opere d’arte, piano viabile, opere d’arte minori, corpo stradale, impianti, opere complementari), ciascuna composta da specifiche sotto-categorie di asset (le pavimentazioni stradali si ritrovano come sottocategoria del piano viabile).

Il modello RAM è composto da modelli locali, basati sul rischio, specifici per ciascuna categoria di asset, i quali permettono di calcolare indicatori sintetici in grado di descrivere lo stato di conservazione e la funzionalità degli elementi analizzati. Questi modelli locali sono integrati con i sistemi informatici esistenti in ANAS, che gestiscono i dati di input necessari per una programmazione ottimale delle attività di manutenzione programmata.

Lo stato di conservazione delle opere viene determinato attraverso rilievi effettuati durante ispezioni periodiche, eventualmente integrati da indagini specialistiche, verifiche strutturali e sistemi di monitoraggio. Si descrive poi questo stato tramite gli indici di degrado, o indici di condizione, che consentono di stabilire una gerarchia di priorità. Tuttavia, per prevedere l’evoluzione del degrado e



programmare correttamente gli interventi, è necessario avere una comprensione più approfondita delle condizioni ambientali e di esercizio. In assenza di serie storiche di dati derivanti da ispezioni, che permetterebbero di prevedere l'andamento del degrado nel tempo tramite modelli matematici specifici (deterministici, stocastici o di intelligenza artificiale), l'influenza delle condizioni ambientali e di esercizio penalizzanti è stata valutata applicando coefficienti peggiorativi. Questi ultimi tengono conto di fattori come la vicinanza alla costa e gli effetti negativi della salinità atmosferica, l'altitudine sul livello del mare, il rischio di neve, e la pericolosità sismica o di dissesto idrogeologico.

Per quanto riguarda i rilievi che conduce durante le ispezioni, il Centro Sperimentale Stradale di Cesano, esegue controlli avanzati per verificare i parametri normativi e programmare la manutenzione, utilizzando tecnologie all'avanguardia quali:

- **ERMES** (Equipment for Routine Evaluation of Macrottexture, Evenness and Skid Resistance): permette di ottenere tutti i parametri necessari per misurare gli indicatori di performance relativi alle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali in un unico passaggio. L'apparecchiatura misura la scivolosità della superficie sul bagnato e la regolarità stradale, ovvero l'intensità e la frequenza delle vibrazioni indotte dal passaggio dei veicoli. I dati raccolti vengono archiviati in un database georeferenziato, utilizzando il sistema DGPS (Differential Global Positioning System) e la progressiva chilometrica.
- **CARTESIO**: strumento per il rilievo topografico delle strade, utile per prevenire il deterioramento dell'asfalto. È un'apparecchiatura mobile e multifunzionale, progettata e sviluppata dal Centro di Ricerca di Cesano, che consente il rilevamento delle caratteristiche e delle pertinenze stradali (catasto) e l'analisi delle pavimentazioni, operando ad alta velocità (fino a 90 km/h).
- **FWD** (Falling Weight Deflectometer by Dynatest): strumento dotato di una massa battente che sollecita la superficie stradale e ne misura la risposta attraverso il bacino di deflessione.
- **TSD** (Traffic Speed Deflectometer): veicolo innovativo per la misurazione della deflessione stradale. Utilizza un sistema di laser doppler per rilevare, ad alta velocità e senza interferire con il traffico, l'abbassamento della carreggiata sotto il peso esercitato dall'asse posteriore del mezzo.

### 1.6.1 Road ANAS Network Internet of Things (RANIoT)

Per ultimo si accenna al progetto innovativo Smart Road che ANAS vuole attuare nelle strade di sua competenza in Italia, che prevede l'integrazione di un sistema "IoT" (Internet of Things). Questo sistema connette il mondo virtuale delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione con il mondo reale, permettendo di monitorare, controllare e trasferire dati per attuare azioni mirate. Nell'ambito della "strada intelligente", i sistemi IoT saranno impiegati per:

- **Structural Health Monitoring (SHM)**, acquisendo e trasmettendo informazioni sullo stato dell'infrastruttura viaria e delle sue opere d'arte principali.
- **Monitoraggio delle condizioni di esercizio**, con dati relativi a traffico, trasporto merci e condizioni ambientali.

In particolare, verranno monitorate grandezze riferite ai seguenti elementi:

- Piano viabile (Fig.50)
- Barriere stradali (guard rail, new jersey, barriere mobili)
- Ponti e viadotti

- Gallerie
- Versanti instabili
- Ambiente
- Aree di sosta
- Cantieri
- Traffico

"Strutture" di monitoraggio	Variabili da misurare	Sensori	Frequenza della misura	Gestione emergenze	Tipologia di rete IoT	Protocollo di comunicazione
Piano viabile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura piano viabile</li> <li>• Asciutto</li> <li>• Umido</li> <li>• Bagnato</li> <li>• Neve</li> <li>• Ghiaccio</li> <li>• Sale residuo</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Umidità critica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SENSORE TEMPERATURA</li> <li>• SENSORE STATO ASFALTO</li> <li>• MICROFONO ASSOCIATO AD ACCELEROMETRO (per la rilevazione delle vibrazioni e lo spettro del rumore)</li> </ul>	Bigiornaliera. Continua in caso di raggiungimento o della soglia di attenzione	Allarme automatico in caso di raggiungimento della soglia di criticità	LP-WAN/WIRED	LoRaWAN/CAN-bus/RS-485/RS-232/EtherCAT

Figura 50 – Monitoraggio RANIoT per il piano viabile

L'infrastruttura del sistema di monitoraggio è generalmente composta da sensori IoT, gateway e/o concentratori e controller del sistema.

I primi sono dispositivi intelligenti, detti "client", che rilevano parametri specifici e scambiano dati con il gateway e/o il concentratore.

Il gateway è un dispositivo di rete che raccoglie i dati dai sensori IoT e li trasmette all'esterno della rete locale.

Il concentratore (o HUB) ha una funzione simile, ma si occupa di gestire e trasmettere i dati provenienti solo da sensori dello stesso tipo (al contrario del gateway).

L'ultimo elemento, il controller del sistema, è il dispositivo incaricato di raccogliere, immagazzinare e gestire i dati provenienti dai gateway.

Si sottolinea, infine, che in Italia l'ANAS ovviamente non è l'unico Ente che si occupa della viabilità stradale in quanto, come precedentemente detto, lavora su circa 30 mila chilometri a fronte dei 173 mila chilometri di strade presenti nella Nazione. I restanti chilometri sono per più responsabilità degli Enti Comunali, i quali operano prevalentemente con un approccio semplificato rispetto ad ANAS e a quanto visto utilizzato all'estero, conseguenza di risorse economiche e tecniche più limitate. Essi si basano principalmente, come il Comune di Torino attualmente, su un'ispezione visiva da parte di operatori esperti nel settore, e una conseguente categorizzazione qualitativa dei tratti stradali in base alla tipologia di interventi di risanamento che ritengono necessaria, come si vedrà più avanti in questo elaborato.

## 2. MOBILE MAPPING SYSTEM

L'evoluzione dei sistemi di mappatura mobile (MMS) ha guadagnato maggiore attenzione negli ultimi decenni. Gli MMS sono stati ampiamente utilizzati per fornire risorse preziose in diverse applicazioni. Ciò è stato favorito dall'ampia disponibilità di sensori a basso costo, dai progressi delle risorse computazionali, dalla maturità degli algoritmi di mappatura e dalla necessità di disporre di dati accurati e su richiesta del sistema informativo geografico (GIS) e di mappe digitali. Molti MMS combinano sensori ibridi per fornire una soluzione più informativa, robusta e stabile grazie alla loro complementarità.

Per MMS si intende un sistema integrato di sensori di mappatura montati su una piattaforma in movimento per fornire il posizionamento della piattaforma durante la raccolta di dati geospaziali. Una tipica piattaforma MMS combina sensori di acquisizione dati come LiDAR (sensori di rilevamento e misurazione della luce) (Light Detection and Ranging) e/o telecamere ad alta risoluzione, con strumenti di posizionamento e georeferenziazione, come il sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) e l'unità di misura inerziale (IMU).

Tradizionalmente, l'elaborazione dei dati MMS richiedeva un'estesa post-produzione per correggere errori e allineare le informazioni geospaziali. Le recenti tendenze degli MMS mirano invece a eseguire la georeferenziazione diretta e a sfruttare le capacità di una piattaforma multisensore per ridurre al minimo gli interventi umani durante la raccolta e l'elaborazione dei dati. Ad oggi, le tecnologie più avanzate mirano a un ulteriore miglioramento dell'automazione grazie all'uso dell'intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico nei processi di estrazione e classificazione degli oggetti.

In genere, gli MMS commerciali possono essere classificati (in base alle piattaforme che li ospitano) in palmari, a zaino, carrellati e basati su veicoli. Alcune piattaforme sono progettate per lavorare al chiuso senza fare affidamento sul GNSS, mentre altre possono lavorare sia al chiuso che all'aperto. La tecnologia di mappatura mobile ha guadagnato maggiore attenzione quando è stata adottata da aziende come Google e Apple per varie applicazioni, tra cui la navigazione e la realtà virtuale.

Un esempio di MMS basato su un veicolo (Leica Pegasus: Two Ultimate) e delle sue tipiche suite di sensori è mostrato nella Figura 51. Il sistema è composto da sensori di acquisizione dati e sensori di posizionamento, i primi sono costituiti principalmente da un LiDAR, in grado di acquisire fino a un milione di punti al secondo, e da telecamere digitali con un campo visivo orizzontale (FoV=Field of View) di 360° che forniscono informazioni su texture e colore. I sensori di posizionamento includono invece un ricevitore GNSS che fornisce le informazioni di posizione globale, con un IMU aggiuntivo e uno strumento di misurazione della distanza (DMI) che ottiene informazioni odometriche per la correzione della posizione integrata. Questi sistemi di posizionamento devono essere calibrati nelle loro posizioni relative e svolgono un ruolo fondamentale nella generazione di nuvole di punti coerenti a livello globale.



Figura 51 – Un esempio di attrezzatura MMS: una piattaforma di mappatura mobile montata su veicolo, composta da diversi sensori di posizionamento e raccolta dati per generare una mappa 3D accurata e georeferenziata dell'ambiente. Qui sono mostrati i principali sensori del Leica Pegasus: Two Ultimate come esempio.

Nonostante la presenza di diverse tecnologie di mappatura mobile sul mercato, il panorama degli MMS rimane estremamente variegato. Non esiste un sistema standard universalmente adottato dalla comunità cartografica, poiché la maggior parte degli MMS sono soluzioni personalizzate che integrano insiemi di sensori con diversi livelli di combinazione e configurazione. Questa diversità implica che ogni sistema presenti vantaggi e limitazioni specifiche.

In questo capitolo si darà una panoramica dei sensori disponibili e delle tecniche per integrarli ai sistemi MMS in diversi scenari applicativi, delineando le fasi principali del processo, dall'acquisizione dei dati fino alla loro elaborazione e ottimizzazione, evidenziando le sfide e le considerazioni chiave legate all'uso degli MMS.

Si concluderà con un focus sulla strumentazione utilizzata da Digitarca s.r.l., azienda che ci ha gentilmente fornito i dati acquisiti nella zona di Cit Turin, area di interesse di questo elaborato.

## 2.1 I DIVERSI SENSORI NEGLI MMS

I sensori di posizionamento e di raccolta dei dati sono due classi di componenti essenziali utilizzati in un tipico MMS. I sensori di posizionamento sono utilizzati per ottenere le posizioni geografiche e il movimento dei sensori, che vengono utilizzati per georeferenziare i dati 3D raccolti. Esempi di questi sensori sono GNSS (Global Navigation Satellite System), IMU (Inertial Measurement Unit), DMI (Directional Movement Index) (cioè odometri), ecc. Per ottenere un posizionamento più preciso dal punto di vista statistico, le misure di questi sensori vengono solitamente utilizzate congiuntamente. Inoltre, l'utilizzo congiunto può essere utile anche tra le telecamere di posizione e di navigazione. La soluzione di fusione dei sensori per il posizionamento è attualmente uno standard, poiché né il ricevitore GNSS né l'IMU/DMI da soli sono in grado di fornire misure sufficientemente accurate e affidabili per la navigazione di piattaforme mobili. Le misurazioni GNSS sono solitamente soggette a variazioni di potenza del segnale in ambienti diversi; ad esempio, si può ottenere un segnale forte in

spazi aperti e un segnale debole o una perdita di segnale in gallerie o in ambienti chiusi, con conseguente perdita di informazioni. D'altra parte, l'IMU e il DMI sono soggetti a un significativo accumulo di errori e sono spesso utilizzati come osservazioni supplementari per la navigazione quando sono disponibili i dati GPS.

I sensori per la raccolta dei dati sono costituiti per lo più da LiDAR e fotocamere digitali, che forniscono misure grezze 3D e 2D dell'ambiente circostante. Le misurazioni 3D di un MMS si basano su sensori LiDAR, mentre le immagini sono utilizzate principalmente per fornire informazioni colorimetriche/spettrali. Con lo sviluppo di metodi avanzati di corrispondenza di immagini dense, queste immagini vengono raccolte anche in modo stereoscopico per fornire ulteriori misure dense per la fusione di dati 3D.

### 2.1.1 Sensori di posizionamento

Come già menzionato, i sensori di posizionamento tipici includono il ricevitore GNSS, l'IMU e il DMI. I loro modelli di errore sono complementari pertanto, nei moderni MMS, si ritrovano utilizzati insieme per fornire informazioni di posizionamento accurate fino al centimetro. Tuttavia, le loro accuratèzze di misura individuali sono ancora fondamentali per l'accuratèzza delle mappe 3D risultanti. La Tabella 6 mostra una panoramica dei sensori di posizionamento.

Tabella 6 - Panoramica dei sensori di posizionamento

Sensor	Description	Benefits	Limitations
GNSS receiver	The signals from orbiting satellites are utilized by the GNSS receiver to compute the position, velocity, and elevation. Some examples include GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou.	<ul style="list-style-type: none"> <li>No/less accumulation of errors due to its dependence on external signals.</li> <li>Data collected under a global reference coordinate system (e.g., WGS84).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Signal inaccessible in complex urban regions e.g., tall buildings, trees, tunnels, indoor environments, etc.</li> <li>Requires post-processing using DGPS and RTK-GPS to minimize errors from receiver's noise, pseudo-range, carrier phase, doppler shifts, atmospheric delays, etc.</li> </ul>
IMU	IMU is an egocentric sensor that records the relative position of the orientation and directional acceleration of the host platform.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capable of navigating in all environments, such as indoors, outdoors, tunnels, caves, etc.</li> <li>A necessary supplemental data source for urban environments where GPS is unstable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requires consistent calibration and a reference to avoid drift from the true position.</li> <li>Limited to short-range navigation.</li> </ul>
DMI	A supplementary positioning sensor measures the traveled distance of the platform, i.e., information derived from a speedometer.	<ul style="list-style-type: none"> <li>A supplemental sensor to provide additional data points to alleviate accumulation errors of IMU sensors.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requires calibration and provides only distance information (1 degree of freedom).</li> </ul>

#### Ricevitore del sistema globale di navigazione satellitare (GNSS)

Il ricevitore GNSS è utilizzato per stimare la posizione assoluta, la velocità e l'elevazione in aree aperte con riferimento a un sistema di coordinate globali (ad esempio, WGS84). Riceve segnali da un minimo di quattro diversi sistemi satellitari di navigazione ed esegue la trilaterazione (metodo che sfrutta i principi geometrici dei triangoli per calcolare le distanze tra punti specifici) per calcolare le posizioni in tempo reale. Poiché dipende da una fonte di segnale esterna, il GNSS non accumula errori significativi. Questi sistemi satellitari si riferiscono principalmente al GPS sviluppato dagli Stati Uniti, al GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) sviluppato dalla Russia, al Galileo costruito dall'Unione Europea e al sistema BeiDou sviluppato dalla Cina. La precisione delle misurazioni, tuttavia, può variare in base alla qualità del ricevitore, all'antenna (monofrequenza o bifrequenza) e all'ambiente di utilizzo.

Per migliorare l'accuratèzza del posizionamento a decimetri e centimetri, gli MMS di alto livello utilizzano spesso soluzioni GPS aumentate, come il GPS differenziale (DGPS) o il GPS cinematico in tempo reale (RTK-GPS) (possono raggiungere una precisione di 1 cm). Il DGPS utilizza una misura basata su un codice e può funzionare con ricevitori a singola frequenza senza tempi di inizializzazione,

mentre l'RTK-GPS utilizza misure in fase e richiede ricevitori a doppia frequenza, inoltre, richiede circa un minuto per l'inizializzazione (per fissare i numeri d'onda). Sia il DGPS che l'RTK-GPS si basano su una rete di stazioni di riferimento, collegate a un punto rilevato nelle sue vicinanze, per applicare correzioni ed eliminare vari errori come i ritardi della ionosfera e altri errori non modellizzati. Il metodo DGPS tradizionale raggiunge un'accuratezza di un ordine di grandezza intorno al metro nella posizione orizzontale, mentre, con tecniche e solutori molto più avanzati, l'RTK-GPS, come tipo di DGPS, può raggiungere un'accuratezza centimetrica in tre dimensioni. Tuttavia, queste misure di accuratezza sono raggiungibili nelle aree aperte, mentre, quando si raccolgono dati 3D in aree urbane dense con edifici alti o in ambienti interni, il segnale GNSS può essere fortemente influenzato dalle occlusioni e le misure risultanti possono essere imprecise. Per questo motivo, quando si opera in queste condizioni, sono necessari altri sensori complementari. In generale, la piattaforma di posizionamento di un MMS dovrebbe raggiungere un'accuratezza di 5-50 mm a velocità che possono raggiungere la massima velocità delle autostrade (120-130 km/h) se si considera l'integrazione di sensori complementari.

### **Unità di misura inerziale (IMU)**

L'IMU è un sensore egocentrico progettato per rilevare l'orientamento e l'accelerazione direzionale della piattaforma su cui è installato, fornendo informazioni di posizione attraverso il metodo del "dead reckoning" (tecnica utilizzata per stimare la posizione di un veicolo basandosi su una posizione iniziale conosciuta, integrata con misurazioni di velocità e direzione nel tempo). A differenza del GNSS, non necessita collegamenti a fonti di segnale esterne e registra le posizioni relative rispetto a un punto di riferimento iniziale (che di solito può essere fornito dinamicamente dal GNSS in campo aperto), purtroppo però, soffre di errori di accumulo, che spesso portano a derive significative rispetto alle posizioni reali.

Per essere più precisi, una IMU è costituita da un accelerometro e da un giroscopio, che utilizza per rilevare l'accelerazione e la velocità angolare. Queste misure grezze vengono inviate a un'unità di calcolo di bordo che applica l'algoritmo di dead reckoning per fornire il posizionamento in tempo reale. Pertanto, l'IMU e l'unità di calcolo, insieme all'algoritmo nel suo complesso, sono chiamati anche sistema di navigazione inerziale (INS).

La qualità dei sensori IMU dipende dal tipo di giroscopio utilizzato: la maggior parte delle IMU leggere e di fascia "consumer" utilizza sistemi microelettromeccanici (MEMS), economici ma poco precisi e soggetti a grandi errori di deriva (spesso 10-100°/h). I sistemi più sofisticati, utilizzano un giroscopio più grande ma più preciso, ad esempio un laser ad anello o un giroscopio a fibra ottica, che può raggiungere un errore di deriva inferiore a 1°/h.

L'IMU può funzionare in ambienti privi di GPS, sia all'interno che all'esterno, e in gallerie, tuttavia, dato l'uso della navigazione a scansione, le sue misure saranno precise solo per un periodo relativamente breve rispetto al punto di partenza. Il GNSS, fornendo un'accuratezza ragionevole in un'area aperta ed essendo che le sue misurazioni non presentano accumuli di errori quando la piattaforma si muove, spesso integra l'IMU per ulteriori osservazioni. Questo approccio standard fornisce informazioni posizionali più accurate in ambienti complessi, caratterizzati da spazi aperti e occlusi.

### **Strumento di misurazione della distanza (DMI)**

Il DMI si riferisce generalmente agli strumenti che misurano la distanza percorsa dalla piattaforma. In molti casi, il DMI è indicato alternativamente come contachilometri o sensore ruota per gli MMS basati su veicoli o biciclette, poiché calcola la distanza in base al numero di cicli di rotazione della ruota.



Il DMI misura solo la distanza, di conseguenza viene spesso utilizzato come informazione supplementare al GNSS/IMU come mezzo efficace per ridurre gli errori accumulati e limitare la deriva dell'IMU in ambienti con GPS negato, come le gallerie.

Richiede una calibrazione prima dell'uso e misura distanza, velocità e accelerazione.

### 2.1.2 Sensori per la raccolta dati

I sensori di raccolta dati sono un altro componente importante di un MMS, utilizzati per raccogliere dati 3D. In generale si tratta di sensori come LiDAR e telecamere ad alta risoluzione che forniscono informazioni sia sulla geometria che sulla texture, e richiedono una georeferenziazione costante utilizzando le informazioni di posizione e orientamento fornite dai sensori di posizionamento per collegare i dati 3D al sistema di coordinate mondiali.

#### **Rilevamento della luce e misurazione del raggio (LiDAR)**

Il LiDAR (Light Detection and Ranging) è uno strumento ottico che utilizza raggi laser direzionali per misurare le distanze e le posizioni degli oggetti. Fornisce misurazioni individuali e accurate di punti su un oggetto 3D, quindi, molte di queste misurazioni costituiscono informazioni sulla forma e sulle caratteristiche della superficie degli oggetti nella scena. Ha molte caratteristiche importanti per un modello 3D, come l'elevata precisione, la capacità di acquisire informazioni 3D dense in breve tempo, l'invarianza all'illuminazione e la possibilità di penetrare parzialmente oggetti radi come le tettoie.

Il LiDAR è ancora uno strumento utilizzato per misurare le posizioni relative, esso richiede una serie di sistemi di navigazione altamente precisi e ben calibrati per recuperare punti 3D globali, la cui installazione e il cui costo, in aggiunta al già costoso sensore LiDAR, lo rendono un mezzo di raccolta ad alto costo.

Il concetto di utilizzo di raggi luminosi per la misurazione delle distanze esiste dal 1930, e dall'invenzione del laser nel 1960, la tecnologia LiDAR ha conosciuto un rapido sviluppo, diventando molto popolare per le applicazioni di mappatura accurata e di guida autonoma. Al giorno d'oggi, esistono molti sensori LiDAR disponibili in commercio per il rilievo o per le applicazioni automobilistiche.

I LiDAR per rilievi raggiungono un'accuratezza millimetrica (di solito 10-80 mm), mentre quelli di qualità relativamente inferiore (che hanno anche un costo inferiore) raggiungono una precisione centimetrica (di solito 1-8 cm), soddisfacendo tipicamente le applicazioni per l'evitamento degli ostacoli e il rilevamento degli oggetti. Questi sensori sono spesso utilizzati nelle piattaforme di guida autonoma, grazie al buon compromesso tra costo e prestazioni.

Il livello di accuratezza e i loro costi sono i principali fattori decisivi nella scelta di un sensore LiDAR, esiste infatti un ampio divario di costo tra i vari gradi dei sensori, con i LiDAR di tipo "survey" che spesso costano centinaia di migliaia di dollari (al momento) e quelli di grado relativamente inferiore che costano circa dieci volte meno.

I sensori LiDAR possono essere classificati, in base ai loro principi di raccolta, in tre categorie principali:

- Rotanti: utilizzano uno specchio rotante che ruota di 360 gradi e reindirizza i raggi laser, di solito ha più fasci e ogni fascio illumina un punto alla volta. Questa tipologia è la più comunemente utilizzata negli MMS, grazie alla sua natura rotante, fornisce un ampio FoV, un elevato rapporto segnale/rumore e nuvole di punti dense.

- A stato solido: utilizzano solitamente specchi MEMS incorporati in un chip, attraverso il quale lo specchio può essere controllato per seguire una traiettoria specifica. Il nome deriva dal non possedere parti mobili nel sensore.
- Flash: di solito illumina l'intero FoV con un ampio fascio in un singolo impulso, analogamente a una fotocamera col flash, questa tipologia utilizza un raggio 2D di fotodiodi (un sensore ottico in grado di trasformare un segnale ottico in un segnale elettrico) per catturare i ritorni laser, che vengono infine elaborati per formare nuvole di punti 3D. In genere, un flash LiDAR ha una portata limitata (meno di 100 m) e un FoV limitato dalle dimensioni del sensore.

Sebbene il LiDAR sia utilizzato principalmente per generare nuvole di punti, può essere utilizzato anche per scopi di localizzazione attraverso diverse tecniche, come la corrispondenza di scansioni. Le informazioni estraibili possono essere ulteriormente migliorate da reti neurali profonde per la differenziazione semantica e la localizzazione. Tuttavia, come molti altri metodi, anche se i sensori LiDAR sono in grado di fornire misure di portata relativamente accurate, le loro prestazioni si deteriorano significativamente in condizioni meteorologiche sfavorevoli come pioggia, neve e nebbia.

La Tabella 7 mostra un esempio di diversi sensori LiDAR esistenti e le loro specifiche tecniche in termini di portata, precisione, numero di raggi, FoV, risoluzione, punti al secondo e frequenza di aggiornamento.

La scelta dei sensori dipende tipicamente dall'applicazione e dalle caratteristiche della piattaforma mobile (ad esempio, la velocità, il carico utile, ecc). Come già detto, la maggior parte degli MMS si affida a sensori LiDAR rotanti, che però hanno spesso un costo elevato rispetto ad altre categorie, pertanto, l'utilizzo di LiDAR a stato solido in un MMS può essere una scelta prevalente, dato il costo inferiore. Quando la velocità del veicolo è elevata, il tempo per acquisire i dati è minore e sono necessari più fasci per garantire che l'oggetto di interesse sia misurato da un numero sufficiente di punti, ad esempio un LiDAR a 32 raggi potrebbe essere sufficiente per un veicolo che si muove a una velocità di 50-60 km/h, ma per velocità più elevate, fino a 100-110 km/h, si consiglia un LiDAR con 128 raggi, in modo che i dati acquisiti abbiano una risoluzione adeguata. Anche il raggio d'azione può essere importante e dev'essere considerato in base all'applicazione, ad esempio, un LiDAR a lungo raggio può essere inutile per applicazioni in interni.

In linea di massima, il costo aumenta di un fattore di 1,5-2 quando il numero di raggi viene raddoppiato, e questo è anche correlato positivamente alla portata operativa.

Tabella 7 - Specifiche dei diversi sensori LiDAR

Company	Model	Range (m)	Range Accuracy (cm)	Number of Beams	Horizontal FoV (°)	Vertical FoV (°)	Horizontal Resolution (°)	Vertical Resolution (°)	Points Per Second	Refresh Rate (Hz)	
RIGEL	VQ-250	1.5–500	0.1	—	360	—	—	—	300,000	—	
	VQ-450	1.5–800	0.8	—	360	—	—	—	550,000	—	
Trimble	MX50 laser scanner	0.6–80	0.2	—	360	—	—	—	960,000	—	
	MX9 laser scanner	1.2–420	0.5	—	360	—	—	—	1,000,000	—	
Rotating	HDL-64E	120	±2	64	360	26.9	0.08 to 0.35	0.4	1,300,000	5 to 20	
	HDL-32E	100	±2	32	360	41.33	0.08 to 0.33	1.33	695,000	5 to 20	
	Puck	100	±3	16	360	30	0.1 to 0.4	2.0	300,000	5 to 20	
	Puck LITE	100	±3	16	360	30	0.1 to 0.4	2.0	300,000	5 to 20	
	Puck Hi-Res	100	±3	16	360	20	0.1 to 0.4	1.33	300,000	5 to 20	
	Puck 32MR	120	±3	32	360	40	0.1 to 0.4	0.33 (min)	600,000	5 to 20	
	Ultra Puck	200	±3	32	360	40	0.1 to 0.4	0.33 (min)	600,000	5 to 20	
	Alpha Prime	245	±3	128	360	40	0.1 to 0.4	0.11 (min)	2,400,000	5 to 20	
	Ouster	OS2-32	1 to 240	±2.5 to ±8	32	360	22.5	0.18	0.7	655,000	10, 20
		OS2-64	1 to 240	±2.5 to ±8	64	360	22.5	0.18	0.36	1,311,000	10, 20
OS2-128		1 to 240	±2.5 to ±8	128	360	22.5	0.18	0.18	2,621,000	10–20	
PandarQT	PandarQT	0.1 to 60	±3	64	360	104.2	0.6*	1.45	384,000	10	
	PandarXT	0.05 to 120	±1	32	360	31	0.09, 0.18, 0.36	1	640,000	5, 10, 20	
Hesai	Oandar40M	0.3 to 120	±5 to ±2	40	360	40	0.2, 0.4	1, 2, 3, 4, 5, 6	720,000	10, 20	
	Oandar64	0.3 to 200	±5 to ±2	64	360	40	0.2, 0.4	1, 2, 3, 4, 5, 6	1,152,000	10, 20	
	Pandar128E3X	0.3 to 200	±8 to ±2	128	360	40	0.1, 0.2, 0.4	0.125, 0.5, 1	3,456,000	10, 20	
Solid-state	Luminar IRIS	Up to 600	—	640 lines/s	120	0–26	0.05	0.05	300 points/square degree	1 to 30	
	InnovizOne	250	—	—	115	25	0.1	0.1	—	5 to 20	
	InnovizTwo	300	—	8000 lines/s	125	40	0.07	0.05	—	10 to 20	
Flash	LeddarTech Pixell	Up to 56	±3	—	117.5 ± 2.5	16.0 ± 0.5	—	—	—	20	
	Continental HFL110	50	—	—	120	30	—	—	—	25	

\*— indicates that the specifications were not mentioned in the product datasheet.

### Sistemi di imaging e telecamere

Le telecamere rappresentano uno dei sensori più diffusi per la raccolta dati negli MMS, grazie al loro basso costo e alla capacità di fornire informazioni sulla texture ad alta risoluzione. Solitamente montate sulla parte superiore o anteriore della piattaforma mobile, queste telecamere catturano immagini dell'ambiente circostante a frequenze elevate, tra 30 e 60 fotogrammi al secondo.

Il loro uso è utile per diversi scopi quali, ad esempio:

- Ricostruzione della geometria della scena: telecamere stereoscopiche o binoculari acquisiscono coppie di immagini sovrapposte, elaborandole con tecniche di corrispondenza stereo-densa per estrarre informazioni sulla profondità;
- Acquisizione delle texture degli oggetti: registrando i fotoni a diverse frequenze spettrali, le telecamere forniscono dettagli fondamentali sull'aspetto naturale degli oggetti, queste informazioni sono utilizzate per generare immagini panoramiche georeferenziate e modelli fotorealistici;
- Riconoscimento e interpretazione semantica della scena: le texture catturate contengono dati cruciali per il rilevamento di oggetti statici come semafori, segnali stradali, segnaletica e corsie di guida, inoltre, grazie ai progressi nel deep learning, le telecamere sono sempre più impiegate per identificare e tracciare anche oggetti in movimento, come pedoni e veicoli.

Esistono numerose tipologie di sensori e configurazioni di telecamere utilizzate negli MMS, a seconda dell'uso previsto, come precedentemente accennato. Tra i principali esempi vi sono telecamere monoculari, binoculari, RGB-D (una telecamera che fornisce sia colori, RGB, che profondità, Depth), sistemi multicamera, fisheye, ecc.

Nella Tabella 8 si riporta una sintesi dei diversi tipi di telecamere.

Le telecamere monoculari (soluzioni a basso costo) forniscono immagini RGB ad alta risoluzione, georeferenziate o panoramiche, ma non offrono informazioni dirette sulla profondità, rendendole inadatte alla ricostruzione 3D accurata.

Le binoculari, invece, sono costituite da due telecamere che acquisiscono immagini stereo sincronizzate per recuperare la profondità e la scala, con un costo computazionale aggiuntivo dovuto alle tecniche di corrispondenza delle immagini stereo-dense. Le prestazioni e l'accuratezza delle informazioni 3D dipendono dalla scelta del metodo di corrispondenza delle immagini stereo-dense.

Le telecamere RGB-D possono fornire simultaneamente immagini RGB e immagini di profondità (attraverso la luce strutturata). Sono utilizzate principalmente in ambienti interni a causa della loro portata limitata, ma l'integrazione del LiDAR con le immagini RGB-D può fornire informazioni 3D molto accurate, anche se ciò può richiedere una pre-compensazione delle incertezze delle immagini RGB-D dovute a rumore casuale o occlusioni.

Per ampliare il campo visivo (FoV) alcuni MMS adottano sistemi multicamera panoramici, che utilizzano più telecamere sincronizzate con un centro ottico comune. Questa configurazione consente di ottenere immagini panoramiche a 360°, agevolando l'integrazione con LiDAR rotanti, ad esempio, e migliorando la sovrapposizione tra immagini e nuvole di punti, risultando particolarmente efficace per la mappatura stradale.

Come alternativa più economica, una telecamera "fisheye" mira a fornire un'immagine con FoV esteso (oltre 180°) da una singola telecamera dotata di una lente sferica. Sebbene sia più economica, il risparmio può avvenire al costo di distorsioni dell'immagine in scala, geometria, forma e illuminazione, che richiedono calibrazioni aggiuntive e leggermente più complesse.

Tabella 8 - Panoramica dei sensori della fotocamera

Type	Description	Benefits	Limitations
Monocular	Single-lens camera.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Low cost.</li> <li>Provides a series of single RGB images to collect high-resolution and geotagged images or panoramas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cannot recover 3D scale without additional sensors.</li> <li>Camera networks suboptimal to generate highly accurate 3D points.</li> </ul>
Binocular	Two collocated cameras with known relative orientation capturing overlapping and synchronized image	<ul style="list-style-type: none"> <li>Can provide depth and scale of objects the scene.</li> <li>Provides better accuracy integrated with LiDAR sensor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Performance and accuracy may depend on the algorithm used to compute the 3D information.</li> </ul>
RGB-D	Cameras that capture RGB and depth images at the same time	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simultaneous data acquisition.</li> <li>Provides high accuracy when integrated with LiDAR.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depth image sensitive to occlusions.</li> <li>Low range.</li> <li>The depth image may include some uncertainties and errors.</li> </ul>
Multi-camera system	A spherical camera system with multiple cameras that can provide a 360° field of view	<ul style="list-style-type: none"> <li>Panoramic view showing the entire scene.</li> <li>Suitable for street mapping applications.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requires large storage to save images in real-time.</li> <li>Must be properly calibrated to assure alignment of images and minimum distortions.</li> </ul>
Fisheye	Spherical lens camera that has more than 180° field of view	<ul style="list-style-type: none"> <li>Provides wide coverage of the scene allowing capture of the scene with fewer images.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lens distortions.</li> <li>Non-projective transformation.</li> <li>Requires rigorous calibration.</li> </ul>

Un moderno MMS beneficia di diverse telecamere che forniscono informazioni aggiuntive, ma di conseguenza presenta alcune complessità in più come:

- Sensibilità all'illuminazione: le immagini vengono catturate sfruttando la luce riflessa dagli oggetti, rendendole vulnerabili a variazioni di luminosità ambientale, come l'elevata gamma dinamica tra cielo e suolo o condizioni atmosferiche sfavorevoli, come la foschia;
- Necessità di calibrazione: per garantire precisione nelle misurazioni, le telecamere e i sistemi multicamera devono essere calibrati per ridurre distorsioni geometriche e ottiche;
- Requisiti per l'acquisizione in movimento: le piattaforme mobili necessitano di telecamere con alta frequenza di acquisizione, in modo da ottimizzare la qualità delle immagini, la risoluzione e la capacità di catturare scene dinamiche senza sfocature.

## 2.2 PIATTAFORME PER MMS

Ci sono alcuni fattori che determinano il tipo di sensore (ad esempio, con/senza GPS) e di piattaforma (montate su veicoli o su zaini, ecc) da utilizzare per le attività MMS, quali i sensori disponibili, il budget del progetto, le soluzioni tecniche, le strategie di elaborazione e i contenuti della scena, interni o esterni ad esempio.

Si possono classificare le piattaforme MMS in veicoli tradizionali e non tradizionali, come dispositivi di mappatura leggeri e portatili. I primi, basati su veicoli, operano principalmente sulle strade principali, raccogliendo dati 3D a livello di città o di isolato. I dispositivi portatili non tradizionali, come i sistemi a zaino e indossabili, i sistemi palmari o i sistemi basati su carrelli, a seconda dell'applicazione e del compito, possono essere utilizzati sia all'aperto che al chiuso in ambienti privi di GPS. Per le applicazioni all'aperto, questi mezzi di mappatura sono utilizzati principalmente per integrare i sistemi basati su veicoli, mappare strade strette e aree che non possono essere raggiunte da veicoli più grandi. Per gli ambienti interni o privi di GPS, le combinazioni di sensori possono essere significativamente diverse da quelle utilizzate all'aperto, ad esempio, possono basarsi principalmente sull'INS (Inertial Navigation System) o sull'odometria visiva per il posizionamento.

In questa sezione si presentano quattro piattaforme MMS tipiche, ovvero una piattaforma veicolare tradizionale e tre piattaforme portatili (sistemi palmari, indossabili e basati su carrelli). Ulteriori dettagli su questi sistemi sono riportati anche in Tabella 9.

Tabella 9 - Specifiche dei diversi MMS

	System	Release Year	Indoor	Outdoor	Camera	LiDAR/Max. Range	IMU	GPS	Accuracy *	Applications
Vehicle-mounted	Leica Pegasus: Two Ultimate	2018	✗	✓	360° FoV	ZF9012 profiler 360° x 41.33°/100 m	✓	✓	2 cm horizontal accuracy 1.5 cm vertical accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Urban 3D modeling.</li> <li>Road asset management.</li> <li>Analyzing change detection</li> <li>Creating HD maps.</li> <li>Generating geolocated panoramic images.</li> </ul>
	Teledyne Optech Lynx HS600-D	2017	✗	✓	360° FoV	2 Optech sensors/130 m	✓	✓	±5 cm absolute accuracy	
	Topcon IP-S3 HD1	2015	✗	✓	360° FoV	Velodyne HDL-32E LiDAR/100 m	✓	✓	0.1 cm road surface accuracy (1 sigma)	
	Hi-Target HiScan-C	2017	✗	✓	360° FoV	650 m	✓	✓	5 cm at 40 m range	
	Trimble MX7		✗	✓	360° FoV	✗	✓	✓	—	
	Trimble MX50	2021	✗	✓	90% of a full sphere	2 MX50 Laser scanner/80 m	✓	✓	0.2 cm (laser scanner)	
	Trimble MX9	2018	✗	✓	1 spherical + 2 side looking + 1 backward/downward camera	MX9 Laser scanner/up to 420 m	✓	✓	0.5 cm (laser scanner)	
	Viametris vMS3D	2016	✗	✓	FLIR Ladybug5+	Velodyne VLP-16 + Velodyne HDL-32E	✓	✓	2-3 cm relative accuracy	
Handheld	HERON LITE Color	2018	✓	✓	360° x 360° FoV	1 Velodyne Puck/100 m	✓	✗	3 cm relative accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mapping enclosed and complex spaces and cultural heritage.</li> <li>Forest surveying.</li> <li>Building Information Modeling.</li> </ul>
	GeoSLAM Zeb Go	2020	✓	✗	Can be added, accessory	Hokuyo UTM-30LX laser scanner/30m	✗	✗	1 to 3 cm relative accuracy	
	GeoSLAM Zeb Revo RT	2015	✓	✗	Can be added, accessory	Hokuyo UTM-30LX laser scanner/30m	✗	✗	0.6 cm relative accuracy	
	GeoSLAM Zeb Horizon	2018	✓	✓	Can be added, accessory	Velodyne Puck VLP-16/100 m	✗	✗	0.6 cm relative accuracy	
Leica BLK2GO	2018	✓	✓	3 camera system 300° x 150° FoV	Up to 25 m 360 x 270	✗	✗	±1 cm in an indoor environment with a scan duration of 2 min		
Wearable	Leica Pegasus: Backpack	2017	✓	✓	360° x 200° FoV	Dual Velodyne VLP-16/100 m	✓	✓	2 to 3 cm relative accuracy 5 cm absolute accuracy	
	HERON MS Twin	2020	✓	✓	360° x 360° FoV	Dual Velodyne Puck/100 m	✓	✗	3 cm relative accuracy	
	NavVis VLX	2021	✓	✓	360° FoV	Dual Velodyne Puck LITE/100 m	✓	✗	0.6 cm absolute accuracy at 68% confidence 1.5 cm absolute accuracy at 95% confidence	
	Viametris BMS3D-HD	2019	✓	✓	FLIR Ladybug5+	16 beams LiDAR + 32 beams LiDAR	✓	✓	2 cm relative accuracy	
Trolley	NavVis M6	2018	✓	✗	360° FoV	6 Velodyne Puck LITE/100 m	✓	✗	0.57 cm absolute accuracy at 68% confidence 1.38 cm absolute accuracy at 95% confidence	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indoor mapping for government buildings, airports, and train stations.</li> <li>Tunnel inspection.</li> <li>Measuring asphalt roughness.</li> <li>Building Information Modeling.</li> </ul>
	Leica ProScan	2017	✓	✓	✗	Leica ScanStation P40, P30 or P16	✓	✓	0.12 cm (range accuracy for Leica ScanStation P40)	
	Trimble Indoor	2015	✓	✗	360° FoV	Trimble TX-5, FARO Focus X-130, X-330, S-70-A, S-150-A, S-350-A	✓	✗	1 cm relative accuracy when combined with FARO Focus X-130	
	FARO Focus Swift	2020	✓	✗	HDR camera	FARO Focus Laser Scanner with a FARO ScanPlan 2D mapper	✓	✗	0.2 cm relative accuracy at 10 m range 0.1 cm absolute accuracy	

\* The accuracy measurement reported by the manufacturers. The measure of the accuracy is unknown if not stated as relative or absolute. The "—" symbol indicates that the specifications were not mentioned in the product datasheet.

### Sistemi montati su veicoli

Questa impostazione si riferisce al montaggio dei sensori sulla parte superiore di un veicolo per acquisire nuvole di punti dense. Questi sistemi consentono un'elevata velocità di acquisizione dei dati, adattandosi alla velocità di marcia del veicolo (30-110 km/h). A seconda dell'applicazione di mappatura, la piattaforma di sensori può essere installata su automobili, treni o barche. In generale, i



sistemi montati su veicoli offrono la massima precisione rispetto ad altre piattaforme di mappatura mobile, soprattutto grazie alle loro dimensioni e al carico utile, che consente loro di ospitare sensori di alto livello.

Un sistema MMS montato su veicolo è solitamente dotato di un LiDAR di livello “survey” che fornisce misurazioni dense e accurate, nonché di una telecamera integrata con FoV a 360° che fornisce informazioni relative alla texture delle superfici. Per quanto riguarda i sensori di posizionamento, un sistema montato su veicolo di solito fonde le misure dei ricevitori GNSS con IMU e DMI. Un esempio è il Leica Pegasus Two Ultimate, riportato in Figura 52.



*Figura 52 – Esempio di un sistema montabile su veicolo, Leica Pegasus: Two Ultimate*

I sistemi montati sui veicoli sono utilizzati per varie applicazioni, come la modellazione 3D urbana, la gestione delle risorse stradali e la valutazione delle loro condizioni. Inoltre, questi sistemi possono essere utilizzati per il rilevamento automatico dei cambiamenti nelle regioni mappate per creare mappe HD aggiornate come risorsa per la guida autonoma e per applicazioni di monitoraggio ferroviario.

Sebbene i sistemi montati su veicoli svolgano un ruolo importante nella mappatura mobile, le loro dimensioni relativamente grandi ne ostacolano l'accessibilità a molti siti, come vicoli stretti e ambienti interni, inoltre, alcuni studi hanno dimostrato che la velocità del veicolo può influire sulla qualità dei dati 3D, creando effetti doppler su scansioni successive. Pertanto, la velocità e il percorso devono essere pianificati prima della missione di mappatura.

### **Sistemi portatili e indossabili**

I sistemi portatili e indossabili presentano un design leggero e compatto, utilizzando sensori di piccole dimensioni. L'operatore può tenere in mano o indossare la piattaforma e camminare nell'area di interesse, si ritrovano infatti spesso progettati come zaini.

Sia i sistemi portatili che quelli indossabili si distinguono per la loro portabilità, che consente di mappare ambienti privi di GPS, come spazi chiusi, terreni complessi o spazi stretti a cui i veicoli non possono accedere. A causa della natura di questi ambienti, i sistemi palmari e indossabili possono non affidarsi ai ricevitori GNSS per il posizionamento, ma possono invece dipendere da un'IMU o utilizzare

un LiDAR e una fotocamera per la raccolta dei dati e la localizzazione (utilizzando approcci di localizzazione e mappatura simultanea (SLAM= Simultaneous Localization and Mapping)).

In Figura 53 si riporta un esempio di diversi sistemi portatili e indossabili.



Figura 53 - Sistemi portatili e indossabili: (a) HERON LITE Color, (b) HERON MS Twin

Come già menzionato, i sistemi palmari e indossabili sono efficaci nella mappatura di spazi chiusi, ad esempio, questi dispositivi possono essere utilizzati per mappare grotte in cui i segnali GNSS e l'illuminazione non sono disponibili, inoltre, vengono utilizzati per mappare siti del patrimonio culturale che possono essere complessi e che richiedono una raccolta efficiente di dati da diversi punti di osservazione. Questi sistemi sono anche efficienti nella mappatura di aree non accessibili alle macchine, come i rilievi forestali, le mappe di sicurezza e protezione, e la modellazione BIM (Building Information Modeling). Tuttavia, per lavorare in aree prive di GPS è necessario compensare la perdita di segnale, il che richiede l'impostazione di GCPs (Ground Control Points) in queste aree o l'utilizzo di informazioni GPS prima di entrare in tali ambienti, mentre, all'interno delle gallerie, la navigazione dipende completamente da IMU, DMI o da sensori di scansione (LiDAR o telecamere).

### **Sistemi basati su carrelli**

Questo tipo di sistema è simile al sistema a zaino, ma risulta leggermente più grande e trasporta un carico utile più pesante. È adatto per la mappatura all'interno e all'esterno, dove il terreno è pianeggiante. In Figura 54 si riporta un esempio di sistema su carrello.

Questa tipologia è adatta a diverse applicazioni, come l'ispezione di gallerie, la misurazione della rugosità dell'asfalto, la creazione di planimetrie e il BIM. Inoltre, sono utilizzati per creare viste geospaziali 3D indoor di tutti i tipi di infrastrutture, come impianti e fabbriche, edifici residenziali e commerciali, aeroporti e stazioni ferroviarie.



Figura 54 – Esempio MMS su carrello, Leica ProScan

## 2.3 STEP DI LAVORO DEGLI MMS

Sono necessarie alcune fasi di elaborazione per trasformare i dati sensoriali grezzi da un MMS al prodotto 3D finale. Queste fasi comprendono generalmente l'acquisizione dei dati, la calibrazione e la fusione dei sensori, la georeferenziazione e l'elaborazione dei dati per la comprensione della scena (Fig.55).

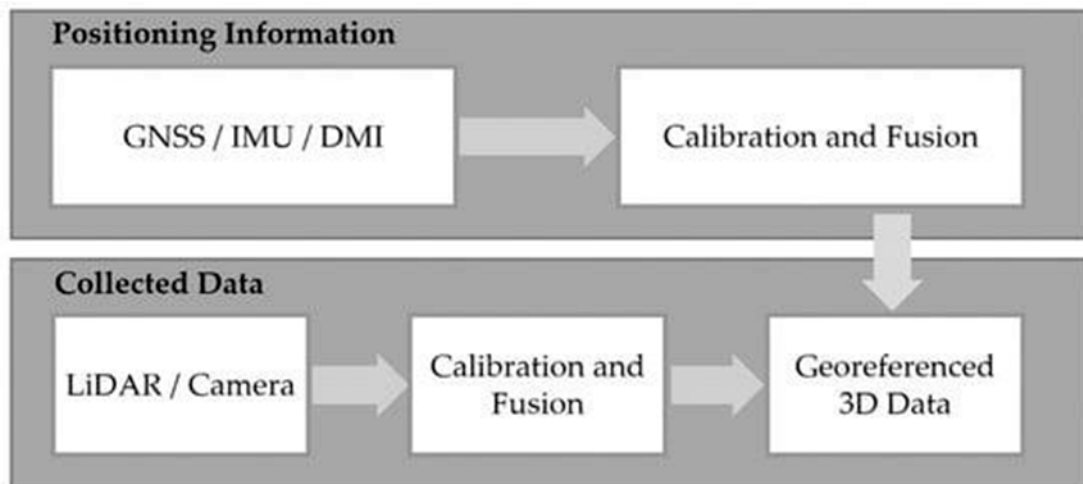


Figura 55 - Processo di elaborazione standard per i dati MMS

### Acquisizione dei dati

Il percorso pianificato deve essere analizzato per determinare le piattaforme e i sensori configurati da distribuire, ad esempio, gli operatori devono essere a conoscenza delle regioni accessibili al GNSS per pianificare i sensori da utilizzare. Per il posizionamento MMS, il GNSS, l'IMU e il DMI misurano continuamente la posizione e il movimento della piattaforma. Nella maggior parte delle applicazioni all'aperto, i dati principali di navigazione e posizionamento sono forniti dal satellite GNSS al ricevitore, mentre l'IMU e il DMI integrano le misurazioni quando i segnali GNSS sono insufficienti o vengono persi. In alcuni casi specifici in cui il GNSS è completamente inaccessibile, come ad esempio la

mappatura delle grotte, verranno utilizzati i punti di controllo GCP per riferire i dati al sistema di coordinate geodetiche. Inoltre, i dati 3D sono raccolti principalmente da un sistema integrato LiDAR e telecamera, dove il LiDAR produce nuvole di punti 3D accurate colorate dalle immagini della telecamera associata.

### **Calibrazione e fusione dei sensori**

La calibrazione e la fusione dei sensori vengono spesso eseguite durante il ciclo di raccolta dei dati. L'obiettivo è calibrare le posizioni relative tra più sensori, quindi tra telecamere, tra telecamera e LiDAR o tra LiDAR, telecamera e sensori di navigazione. Inoltre, i loro risultati devono essere fusi in una fase di post-elaborazione per ottenere misure posizionali più precise. Queste servono a molteplici scopi: localizzazione più accurata, ricostruzione geometrica più precisa e allineamento dei dati per la fusione.

Alcune procedure di calibrazione tipiche degli MMS sono:

- Calibrazione e fusione dei sensori di posizionamento

L'integrazione di GNSS, IMU e DMI è suddivisa in diverse fasi. La prima è la pre-calibrazione in laboratorio o in fabbrica, che stima l'offset relativo tra questi sensori e la loro posizione relativa rispetto ai sensori di raccolta dati. La seconda fase prevede la fusione delle informazioni dei sensori per produrre le posizioni stimate attraverso stimatori statistici e stocastici. Un tipico algoritmo utilizzato a questo scopo è il filtro di Kalman (KF), che utilizza misure continue nel tempo, con le loro incertezze, e un modello stocastico per ogni sensore per stimare le variabili incognite in uno schema ricorsivo. Il KF è il più semplice stimatore dinamico, assume modelli lineari e un rumore casuale gaussiano delle osservazioni, e viene spesso adottato attraverso il KF esteso (EKF) nel caso di modelli non lineari linearizzati. Tuttavia, la convergenza non è garantita per l'EKF, soprattutto quando il rumore casuale non segue la distribuzione gaussiana. Una valida alternativa è il filtro a particelle, in quanto è in grado di simulare i rumori per gestire le potenziali distribuzioni di rumore non gaussiane.

- Calibrazione della telecamera

La calibrazione della telecamera si riferisce al processo di determinazione dei parametri intrinseci della telecamera (come lunghezza focale e punto principale), delle varie distorsioni dell'obiettivo (ad esempio, la distorsione radiale) e di altre distorsioni intrinseche, come gli errori di affinità o di decentramento. I parametri di calibrazione della telecamera seguono spesso il modello standard di Brown o i parametri estesi che modellano anche gli errori dovuti agli spostamenti della pellicola e del chip. L'approccio tradizionale e più rigoroso per la calibrazione della telecamera utilizza un campo di controllo 3D costituito da matrici di punti fisici 3D altamente precisi. Le immagini convergenti di queste matrici di punti vengono acquisite a varie angolazioni e posizioni. Questi punti 3D, insieme alle corrispondenti osservazioni 2D sull'immagine, sono sottoposti a una rigorosa BA (Bundle Adjustment, una procedura di minimizzazione non lineare dell'errore che permette di aggiustare i punti e le camere minimizzando l'errore di riproiezione) con parametri aggiuntivi (i parametri di calibrazione). I campi di controllo 3D sono, purtroppo, impegnativi e costosi, di conseguenza questo approccio è utilizzato soprattutto per la calibrazione di telecamere per il rilievo o aeree a livello di fabbrica.

Un altro metodo di calibrazione, diffuso e meno impegnativo, è quello basato sul cloud. Esso utilizza bersagli codificati, che possono essere posizionati arbitrariamente (ma ben distribuiti

con determinate variazioni di profondità) in una scena come una nuvola di bersagli. La convergenza delle immagini di questi target può produrre misure multi-raggio 2D molto accurate, che vengono inserite in un network a libero accesso di BA per calibrare i parametri della camera. Grazie alla sua semplicità, questo metodo è spesso utilizzato come una buona alternativa per calibrare le telecamere per applicazioni a distanza ravvicinata, comprese le applicazioni MMS.

Un metodo di calibrazione meno rigoroso, ma spesso utilizzato, sfrutta una scacchiera come bersaglio per la calibrazione, che estrae misure 2D regolarmente distribuite dalle immagini della scacchiera ed esegue una BA autocalibrata. Tuttavia, a causa della copertura limitata della scena, della natura planare della scacchiera (priva di variazioni di profondità) e della limitata flessibilità nell'acquisizione di immagini ben convergenti e con diverse caratteristiche, questo metodo potrebbe non riuscire a decorrelare i parametri della telecamera dai parametri di orientamento esterno, con conseguenti potenziali errori di calibrazione. Poiché è molto utilizzato nella comunità della computer vision e ben supportato da strumenti open-source disponibili, è uno degli approcci più popolari per ottenere calibrazioni rapide e può essere utilizzato per calibrare telecamere che non richiedono un'elevata precisione di rilievo, come le telecamere di navigazione.

Quando si calibra un sistema a più telecamere la calibrazione viene estesa per stimare anche l'orientamento relativo tra esse. La calibrazione passa ancora attraverso un BA, ma richiede almeno la conoscenza della scala dei target (le nuvole di target o la scacchiera) per stimare metricamente le linee di base tra tutte le telecamere.

#### - Calibrazione del LiDAR e della telecamera

La calibrazione tra LiDAR e camera riguarda vari aspetti: innanzitutto, le immagini devono essere sincronizzate temporalmente con le scansioni LiDAR, in secondo luogo, è necessario calcolare l'orientamento relativo dei raggi del LiDAR e della telecamera, infine, devono avere lo stesso punto di vista per evitare parallassi.

La sincronizzazione temporale è una delle fasi di calibrazione più importanti per correggere gli sfasamenti temporali tra i sensori. Si tratta di far coincidere i dati registrati e misurati da sensori diversi con orologi separati, per creare dati ben allineati in termini di tempo e posizione. Gli offset temporali sono dovuti a offset dell'orologio, che si riferisce alla differenza di tempo tra gli orologi interni dei sensori, o a una deriva dell'orologio, che si riferisce agli orologi dei sensori che operano a frequenze o tempi diversi. Uno sfasamento temporale superiore ai millisecondi tra LiDAR e telecamera può causare errori di posizionamento significativi durante la registrazione di un oggetto, inoltre, l'impatto può essere più significativo ed evidente se la piattaforma opera ad alta velocità. Per risolvere questo problema, i sensori devono avere un riferimento temporale comune, spesso basato sull'orario del GNSS grazie alla sua elevata precisione e alla capacità di registrare posizioni in nanosecondi. I tempi registrati dal LiDAR e dalla telecamera vengono corretti in tempo reale dal sistema informatico di bordo, quest'ultimo aggiorna i dati in base all'orario del GNSS.

L'orientamento relativo si riferisce alla stima dei parametri di traslazione e orientamento tra i sensori. Questo tipo di calibrazione deve essere effettuata periodicamente a causa del deterioramento del meccanismo all'interno dei sensori e tra di essi dopo aver operato in ambienti diversi. Una calibrazione rapida può essere eseguita utilizzando una singola immagine in cui vengono selezionati quattro punti corrispondenti tra l'immagine e la scansione

3D, utilizzando i punti d'angolo naturali ben identificati o bersagli codificati altamente riflettenti.

Idealmente, i dati LiDAR e della telecamera devono essere ben allineati, ma a causa della distanza tra i due sensori, essi spesso osservano gli oggetti da angolazioni diverse, causando grandi parallassi tra loro. Un'ampia parallasse provoca distorsioni cruciali, come punti ribaltati o volanti, occlusioni, ecc. Per risolvere questo problema, i parametri di orientamento relativo vengono utilizzati per proiettare i dati LiDAR nel sistema di coordinate della telecamera.

### **Georeferenziazione delle scansioni LiDAR e delle immagini della telecamera mediante dati di navigazione**

Sia la scansione LiDAR che le immagini raccolgono dati in un sistema di coordinate locali. La georeferenziazione si riferisce alla determinazione delle coordinate globali/geodetiche, per lo più basate su dati di posizionamento GNSS/IMU/DMI fusi. Si tratta di un processo successivo alla calibrazione di questi sensori di raccolta dati. La georeferenziazione comprende la stima dei parametri o offset di orientamento e posizione rispetto a GNSS e IMU, questi definiscono la relazione geometrica tra i sensori di posizionamento e di raccolta dati.

Esistono due approcci per eseguire la georeferenziazione: l'approccio diretto, che utilizza solo i dati GNSS/IMU, o l'approccio indiretto, che utilizza i dati GNSS/IMU in aggiunta a GCP e BA per il raffinamento dei risultati. I primi sono meno impegnativi e possono raggiungere un'accuratezza compresa tra il decimetro e il centimetro, mentre gli approcci indiretti possono fornire risultati più accurati (a livello centimetrico) e precisi quando si adottano metodi di rilievo tipici come GCP e BA. Per contro, questi ultimi sono molto costosi e la loro accuratezza può variare in base alla configurazione dei GCP, ovvero la loro posizione e numero.

### **Elaborazione dei dati per la comprensione della scena**

La mappatura mobile è molto importante per i veicoli autonomi, dove la comprensione della scena è fondamentale non solo per automatizzare il processo di mappatura, ma anche per fornire informazioni critiche sulla scena in tempo reale per supportare la mobilitazione della piattaforma. La comprensione della scena è il processo di identificazione della semantica e della geometria degli oggetti. Con la maggiore capacità di elaborazione delle unità di elaborazione mobili, i modelli avanzati di apprendimento automatico e i set di dati in continuo aumento, si sta affermando la tendenza a eseguire l'elaborazione dei dati a bordo e la comprensione della scena utilizzando le misure raccolte dal sistema mobile. Queste includono il rilevamento, il tracciamento e la segmentazione semantica in tempo reale di oggetti dinamici, come i pedoni, e statici, come la segnaletica stradale, in una scena. Ciò ha determinato la necessità di sviluppare insiemi di dati di riferimento rappresentativi, addestramenti meglio generalizzati, approcci di adattamento al dominio e modelli di apprendimento automatico più leggeri o strutture di rete che supportino le inferenze dei risultati in tempo reale.

## **2.4 APPLICAZIONI**

La mappatura mobile fornisce risorse preziose per diverse applicazioni, grazie non solo all'ampia disponibilità di piattaforme MMS facili da usare e portatili, ma anche alla loro disponibilità in diversi ambienti operativi. Ciò risulta particolarmente utile in quanto la maggior parte di queste applicazioni si basa su dati acquisiti regolarmente per scopi di rilevamento e monitoraggio.



Alcune delle principali applicazioni della tecnologia di mappatura mobile sono la gestione degli asset stradali e la valutazione delle loro condizioni, la creazione di BIM, la risposta a disastri e la conservazione del patrimonio culturale. Esempi di queste applicazioni si riportano in Tabella 10.

Tabella 10 - Panoramica delle applicazioni di mappatura mobile

APPLICAZIONI		CARATTERISTICHE
Road asset management and condition assessment	Extraction of road assets; road condition assessment; detection of pavement distress using deep learning; evaluation of pavement surface distress for maintenance planning	-Vehicle-mounted system regularly operating on the road -More efficient than manual inspection -Leveraging deep learning to facilitate the inspection process
BIM	Low-cost MMS for BIM of archeological reconstruction; analysis of BIM for transportation infrastructure	-Data are collected with portable systems -Useful for maintenance and renovation planning -Rich database for better information management
Emergency and disaster response	Network-based GIS for disaster response; analyzing post-disaster damage	-Timely and accurate disaster response -Facilitates the decision-making process -Effective training and simulations
Vegetation mapping and detection	Mapping and monitoring riverine vegetation; tree detection and measurement	-Accurate and automatic measurements -Reduces occlusions for 3D urban models
Digital heritage conservation	Mapping a complex heritage site using handheld MMS; mapping a museum in a complex building; numerical simulations for structural analysis of historical constructions; digital heritage documentation; mapping archeological sites; development of a digital heritage inventory system	-Utilizes the flexibility of portable platforms Enables virtual tourism -Digital recording of cultural sites

### Gestione degli asset stradali e valutazione delle condizioni

Gli MMS che operano sulle strade possono raccogliere dati 3D accurati della strada e dei suoi dintorni, che facilitano la gestione, la mappatura e il monitoraggio degli asset stradali (come segnaletica stradale, dimensioni della pavimentazione, ecc). La creazione di inventari dei beni stradali è di grande importanza, dato il loro grande volume. Inoltre, dato che le condizioni delle strade si deteriorano nel tempo, sono necessari strumenti automatici per la manutenzione regolare dei trasporti, come il rilevamento delle fessure e delle lesioni della pavimentazione. Può essere quindi un grande vantaggio la generazione di un inventario aggiornato e accuratamente georeferenziato dei beni stradali consentendo il rilevamento automatico ed efficiente delle modifiche superficiali, al posto delle tradizionali e laboriose ispezioni manuali, contribuendo ad aumentare la sicurezza stradale, ad esempio rilevando buche, valutando la posizione dei segnali di velocità prima delle curve orizzontali sulle strade, ecc, come detto al capitolo precedente.

### Building Information Modeling

Il BIM è una delle tecnologie più consolidate nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni. Fornisce un database digitale integrato su un bene, come un edificio, una galleria, un ponte o un modello 3D di una città, durante il ciclo di vita del progetto. Le fasi tipiche del BIM

comprendono una rigorosa raccolta di dati, la preparazione di piani 2D e il caricamento di questi in programmi software specializzati per convertirli in formato digitale. I dati raccolti comprendono informazioni quali il progetto architettonico (materiali e dimensioni), il progetto strutturale (travi, colonne, ecc.), il progetto elettrico e meccanico, i sistemi fognari, ecc. Ciò può facilitare i processi di progettazione, manutenzione e ristrutturazione di edifici e infrastrutture ingegneristiche. Tuttavia, può essere un compito impegnativo a causa della quantità di dati che devono essere raccolti e della mancanza di processi automatizzati, il che può aumentare tempi e costi.

Al giorno d'oggi, gli MMS sono già stati adottati per i progetti BIM grazie alla loro elevata accuratezza, all'efficienza dei tempi e ai costi ridotti di raccolta dei dati 3D. Le nuvole di punti e le immagini raccolte vengono utilizzate per produrre il modello 3D di un bene, successivamente elaborate con segmentazione semantica o classificazione per estrarre informazioni dettagliate su tutti gli elementi del bene. Il prodotto finale viene poi trasferito al software BIM per estrarre e simulare informazioni importanti relative al ciclo di vita del progetto. In generale, gli MMS possono fornire risultati sufficientemente accurati per i prodotti BIM. Un esempio di MMS nel BIM è la modellazione 3D delle città, dove gli MMS possono essere usati per raccogliere informazioni sugli edifici lungo le strade come le loro informazioni strutturali, ad esempio, la disposizione delle finestre e delle porte. Inoltre, possono essere utilizzati anche per registrare gli asset 3D interni e i layout degli edifici, che possono essere generati utilizzando MMS palmari, a zaino o a carrello.

### **Risposta alle emergenze e ai disastri**

I dati geospaziali forniti dagli MMS sono fondamentali per migliorare le emergenze, le risposte ai disastri e i progetti di recupero post-catastrofe. Gli MMS forniscono soluzioni efficienti in termini di costi e di tempo per raccogliere e produrre modelli in 3D con informazioni dettagliate sulla semantica e sulla geometria per navigare attraverso un'emergenza o un disastro. In molti casi, le planimetrie degli edifici non sono aggiornate dopo la costruzione, il che può ostacolare una missione di salvataggio in caso di emergenza incendio.

Un altro esempio è la raccolta di dati 3D sui beni stradali e la loro immissione nei sistemi GIS, che possono servire come strumenti di analisi pre-evento per identificare i potenziali impatti dei disastri naturali attraverso simulazioni (ad esempio, simulazioni di alluvioni, terremoti, ecc.), aiutando la pianificazione preventiva.

### **Mappatura e rilevamento della vegetazione**

La mappatura mobile ha dimostrato un grande successo nella raccolta di informazioni dettagliate e ad alta risoluzione inerenti la presenza di vegetazione, utilizzate per creare inventari digitali aggiornati degli alberi per la pianificazione e la gestione del verde urbano, accelerando notevolmente le ispezioni visive, tradizionalmente molto laboriose. Il monitoraggio della vegetazione è importante per limitare il declino della biodiversità e identificare gli alberi pericolosi, perciò risulta importante il mantenimento di un database digitale aggiornato dei dati sulla vegetazione. I dati possono essere utilizzati per modellare gli alberi e visualizzarli nei modelli 3D urbani.

Il flusso di lavoro potrebbe consistere in tre fasi principali: il rilevamento degli alberi segmentando le nuvole di punti generate, la semplificazione della struttura rilevata dalle nuvole di punti, la derivazione dei parametri geometrici, come l'altezza della chioma, la larghezza e il diametro della corona. La nuvola di punti raccolta potrebbe essere utilizzata per rilevare anche gli alberi e la vegetazione bassa ai margini delle strade per tenere conto dell'occlusione delle facciate degli edifici e fornire informazioni per la modellazione delle città. Si potrebbero utilizzare i dati anche per calcolare la biomassa urbana,

per combattere le isole di calore e per contribuire all'analisi dell'influenza dell'ecosistema sui cambiamenti climatici.

### **Conservazione del patrimonio digitale**

Risulta di fondamentale importanza documentare digitalmente i siti archeologici e preservare il patrimonio culturale mentre sono ancora in buone condizioni. Molti siti sono a rischio di deterioramento e crollo, che può essere accelerato a causa di condizioni meteorologiche estreme e disastri naturali, come il crollo di molti di essi in Nepal e Iran a causa di terremoti.

Un sito ben documentato può consentire ad altri mezzi di turismo, come i tour virtuali, di ridurre la visita dello stesso e di conseguenza ridurre i fattori umani che incidono sul deterioramento di questi posti. L'MMS può essere utilizzato per creare modelli 3D di siti archeologici complessi e di grandi dimensioni. Il processo di raccolta dei dati per questi siti spesso richiede scansioni multiple dell'interno e dell'esterno da diverse angolazioni per generare modelli 3D realistici e privi di occlusioni. Ad esempio, un sistema montato su un veicolo potrebbe essere utilizzato per girare intorno ai siti per raccogliere informazioni sull'esterno, mentre dispositivi indossabili o portatili potrebbero essere utilizzati per scansionare gli interni.

## **2.5 MMS DIGITARCA**

Nello specifico caso di questo elaborato, i dati utilizzati per le analisi su Cit Turin sono stati forniti da Digitalca s.r.l., la quale utilizza un MMS di tipo RIEGL VMY-2 (Fig.56).



*Figura 56 – RIEGL VMY-2*

Questo è un sistema di mappatura compatto ed economico, dotato di 2 sensori LiDAR della serie miniVUX di RIEGL e impostato per l'integrazione opzionale di un massimo di 4 telecamere per l'acquisizione simultanea di immagini, a complemento dei dati LiDAR acquisiti.

Le caratteristiche principali sono la possibilità di acquisire fino a 200 linee di scansione al secondo, l'alta velocità di ripetizione degli impulsi (fino a 400 kHz di frequenza) e una precisione anche di 10 mm. Inoltre, il campo visivo è di 360°, possiede una portata di 280 m, ha capacità di bersaglio multiplo e il sistema GNSS/INS è integrato.

In Figura 57 e 58 si riportano due foto scattate al veicolo utilizzato da Digitalca.



*Figura 57 – Veicolo Digitarca con sistema MMS montato*



*Figura 58 – Veicolo Digitarca, ben visibile il DMI collegato alla ruota*

Nelle Figure 59,60 è stato fatto uno zoom sull'attrezzatura montata sul veicolo, dove si possono notare con chiarezza il sistema RIEGL e la telecamera panoramica che hanno scelto di adoperare. Si riquadra in rosso il sistema GNSS.





*Figura 59 – Sistema MMS montato su veicolo Digitarca, inquadramento sistema GNSS*



*Figura 60 – Sistema MMS montato su veicolo Digitarca*

Tra le tipologie di telecamere adoperabili per il RIEGL VMY-2 rientrano quelle direzionali, ottime per l'acquisizione di elementi verticali, quelle per i marciapiedi, che puntano verso il basso lateralmente al veicolo, e infine le telecamere panoramiche, come quella scelta in questo caso. Queste ultime acquisiscono immagini ad alta risoluzione, fino a 72 megapixel, e risultano ideali per una documentazione ambientale completa, come la mappatura urbana e l'analisi del paesaggio.



Si riporta uno zoom su di essa nella foto seguente (Fig.61).



*Figura 61 – Camera panoramica installata sul veicolo di Digitarca*

Il rilevamento operato da Digitarca è condotto ai 30 km/h e per l'area di Cit Turin sono stati impiegati circa un paio di giorni per il rilevamento dei dati. Il rilievo è stato offerto al comune da Intesa Sanpaolo, a titolo gratuito.

## 2.6 TREND FUTURI

L'adozione della tecnologia di mappatura mobile in varie applicazioni non solo aumenta la produttività, ma riduce anche i costi di gestione. Ad esempio, l'utilizzo di risorse digitali per l'edilizia ha portato a un aumento della produttività del 14-15% nel settore globale delle costruzioni, la digitalizzazione delle strutture storiche attraverso la creazione di BIM utilizzando i dati di mappatura mobile consentirà la conservazione preventiva degli edifici del patrimonio, con un risparmio del 40-70% sui costi di manutenzione, i dati di mappatura mobile aprono la strada alla produzione di nuovi studi e metodi di monitoraggio delle strade che aumenteranno la sicurezza stradale e ridurranno drasticamente la probabilità di incidenti.

Lo sviluppo e l'adattamento degli MMS ad applicazioni specifiche è uno sforzo continuo, poiché, data la complessità del terreno, un singolo o pochi MMS difficilmente potrebbero essere sufficienti a tutti i livelli delle applicazioni di mappatura mobile. Ad oggi, gli MMS sono ancora considerati un mezzo di raccolta costoso, per via del fatto che le attrezzature, i sensori e la manodopera necessari per gestire la logistica e l'elaborazione di dati sono ancora considerevoli. Pertanto, le tendenze in atto e future risultano:

- Riduzione dei costi dei sensori ad alta risoluzione, in particolare dei sistemi LiDAR, mantenendo un'accuratezza e una risoluzione comparabili a quelli attuali, ma con un prezzo significativamente inferiore;
- MMS collaborativi e in crowdsourcing che sfruttano i dati degli smartphone (ad esempio, i nuovi modelli iPhone è stato dotato di un sensore LiDAR a basso costo);
- Incorporazione di nuovi sensori, come i sistemi di localizzazione a banda ultralarga e la localizzazione basata su WiFi per l'uso negli MMS;
- Uso migliorato (più robusto) delle telecamere come sensori visivi per la navigazione;
- Maggiore flessibilità nell'integrazione e nella personalizzazione dei sensori, supportata da sistemi software più avanzati (ad esempio, algoritmi di autocalibrazione tra più sensori) che permettono una configurazione più semplice e adattabile a diversi ambienti di mappatura;
- Sviluppo di algoritmi avanzati di post-elaborazione per la stima della posa, la registrazione dei dati per ambienti a distanza ravvicinata, la rimozione dinamica degli oggetti per la pulizia dei dati e il perfezionamento per le raccolte in ambienti complessi;
- L'integrazione di nuove soluzioni di deep learning a tutti i livelli di elaborazione, dalla navigazione e calibrazione del dispositivo, alla ricostruzione e interpretazione delle scene 3D.

Data la complessità degli MMS e dei loro scenari applicativi, è probabile che non esista una soluzione unica. Tuttavia, potrebbe essere possibile snellire e ottimizzare la personalizzazione del sistema.

### 3. RICONOSCIMENTO DISSESTI STRADALI

In questo capitolo si iniziano a trattare le metodologie sviluppate per andare incontro all'esigenza del Comune di Torino di trovare una soluzione alternativa alla valutazione visiva e manuale delle condizioni della pavimentazione stradale.

Come precedentemente citato, i dati a disposizione erano la nuvola di punti risultante dal rilievo di Digitarca tramite il loro MMS e le annesse immagini ad alta risoluzione.

Le nuvole di punti sono insiemi di coordinate spaziali che descrivono la superficie di un oggetto o di una scena tridimensionale. Ogni punto è caratterizzato da una posizione nello spazio, espressa tramite le coordinate (x, y, z), e può includere attributi aggiuntivi come il colore RGB e la riflettività. Questa rappresentazione fornisce una versione "grezza" dell'oggetto o dell'ambiente, spesso utilizzata come base per ulteriori elaborazioni e ricostruzioni 3D.

I dati inoltratici possedevano un'accuratezza intorno ai 10 mm e una densità di oltre 1000 punti/mq.

Si è inizialmente pensato di applicare un metodo semi-automatico con l'utilizzo di QGIS, in quanto software gratuito e open source, conseguentemente facilmente accessibile e diffuso, così che potesse essere un approccio facilmente sfruttabile.

Successivamente si è invece passati ad un approccio più automatizzato, in quanto il primo richiedeva ancora un intervento manuale oneroso. In questo caso si è però aggiunto l'utilizzo di un altro software oltre a QGIS, ovvero il LiDAR360MLS di GreenValley International.

### 3.1 APPROCCIO SEMI-AUTOMATICO

Un iniziale metodo per il riconoscimento dei dissesti stradali è stato svolto sul software *QGIS* focalizzandosi solamente lungo un tratto di via Principi d'Acaja, precisamente dall'incrocio con via Susa fino a quello con via Giovanni Carlo Cavalli (rispettivamente in alto e in basso nella Fig.62).

*QGIS* è un software GIS open source (FOSS = Free and Open Source Software) gratuito utilizzato per gestire informazioni geografiche.

Un GIS (Sistema Informativo Geografico) è composto da dati digitali, ovvero le informazioni geografiche visualizzabili e analizzabili tramite computer, dall'hardware, quindi i dispositivi utilizzati per archiviare, elaborare e visualizzare i dati, e infine dal software, che è il programma che permette di lavorare con i dati geografici digitali, chiamato applicazione GIS.

Con un GIS è possibile aprire mappe digitali, aggiungere nuovi dati, eseguire analisi spaziali e creare carte personalizzate per la stampa.

Le informazioni gestite in un GIS possono essere di diverso tipo: dati vettoriali, che rappresentano punti, linee e aree attraverso coordinate X e Y, o dati raster, quindi immagini organizzate in una griglia di valori, come le fotografie satellitari. A differenza dei vettoriali, i raster possono perdere qualità e apparire "a blocchi" se ingranditi troppo.

L'aspetto distintivo di un GIS è la capacità di associare informazioni descrittive ai dati geografici, rendendolo uno strumento potente per analisi e rappresentazioni cartografiche.

Inizialmente, si è fatto uso del software *Agisoft Metashape*, col quale si è ricavato un DEM (=Digital Elevation Model) inserendo la nuvola di punti dei dati rilevati sulla strada.

Un modello digitale di elevazione è una rappresentazione digitale dell'altitudine di un'area geografica o di una superficie. Solitamente, viene generato in formato raster, assegnando a ogni pixel un valore che indica l'altitudine assoluta del punto corrispondente.

*Agisoft Metashape* è un software di fotogrammetria avanzato che elabora immagini digitali per creare modelli 3D dettagliati e mappe georeferenziate. Utilizzato in ambiti come GIS, documentazione del patrimonio culturale, effetti visivi e misurazioni di oggetti su diverse scale, offre strumenti potenti per l'elaborazione spaziale.

Il software, tra le varie funzionalità, permette la generazione di nuvole di punti dense, con strumenti per la modifica e la gestione dei dati, supportando l'importazione e l'esportazione in formato LAS per un flusso di lavoro ottimizzato.

Per ottenere solo la parte visibile in Fig.62 è stato creato il DEM tagliando in altezza la nuvola di punti, così da ridurre i dati non utili, ovvero edifici e macchine, dei quali son rimasti solo i perimetri alla base.



Il file ricavato è stato poi caricato nel software QGIS (versione 3.34.6) per proseguire con l'analisi.



Figura 62 – Visualizzazione in QGIS del DEM del tratto stradale

Si procede poi a ritagliare la superficie tramite il comando “clip raster by mask layer” dopo aver creato una maschera che comprendesse solo il manto stradale, visibile in verde in Fig. 63. In Fig.64 si può osservare il risultato del ritaglio.



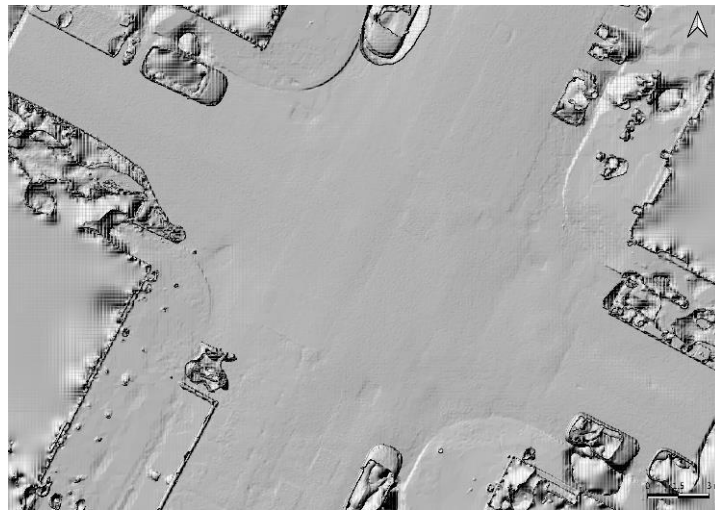
Figura 63 – Maschera sovrapposta per ritagliare la superficie





*Figura 64 – Ritaglio del solo manto stradale*

Tramite il download del pacchetto SAGA, si può utilizzare il comando “*fill sink – wang & liu*” sul DEM, il quale riempie in automatico le depressioni stradali (Fig. 65: prima di utilizzare il comando, Fig. 66: risultato).



*Figura 65 – Incrocio centrale*

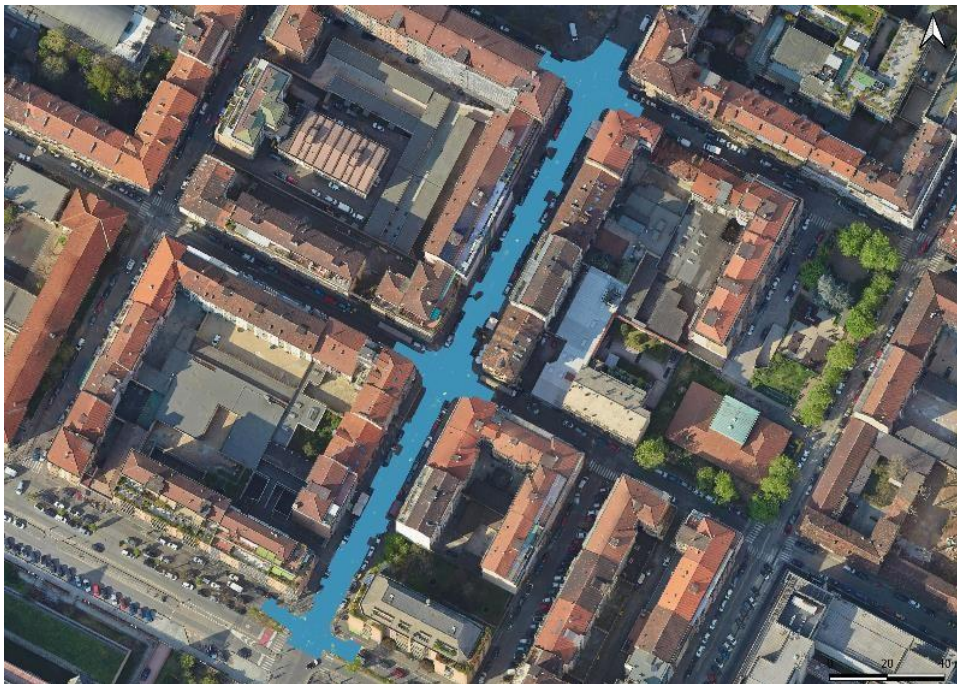




*Figura 66 – Incrocio centrale dopo l'utilizzo di "fill sink"; si nota il riempimento delle depressioni*

Successivamente, utilizzando "raster calculator", si opera la differenza tra il file iniziale e quello "riempito" appena ottenuto, così da mettere in risalto le depressioni.

In Figura 67 si può osservare il risultato con visualizzazione impostata in "singleband pseudocolor", mentre nella Fig. 68 uno zoom sull'incrocio centrale.



*Figura 67– Risultato ottenuto dalla differenza tra file iniziale e file "riempito" visualizzato in singleband pseudocolor*



Figura 68– Zoom sull'incrocio centrale

Tramite “*raster layer statistics*”, da quest’ultimo file ottengo le seguenti statistiche:

<b>STATISTICA</b>	<b>VALORE</b>
Minimum value	-0.0997314453125 m
Maximum value	0.1777496337890625 m
Range	0.2774810791015625 m
Sum	-929.7103424072266 m
Mean value	-0.0001935116642519904 m
Standard deviation	0.001087420468032162 m
Sum of the squares	5.68113919779011 m <sup>2</sup>

Dove i valori utili sono il massimo e il minimo, espressi in metri, che forniscono il range tra cui variano i punti.

Si prosegue con l’individuazione delle buche estrapolando esclusivamente i valori inferiori o uguali a -0.01 tramite “*raster calculator*”. Il risultato lo si può osservare in Fig.69, in cui si riportata esclusivamente l’incrocio centrale così da avere una migliore visualizzazione.



Figura 69 – In blu le aree con valori inferiori o uguali a  $-0.01m$

Successivamente, si converte il raster in un vettore (uno shapefile) e lo si categorizza così da avere in azzurro le buche (con valore 1) e in viola il resto (valore 0), come si può notare in Fig.70. Il comando utilizzato per quest'operazione è "polygonize".



Figura 70 – Risultato della poligonalizzazione

In "data management tools" si trova il comando "split vector layer" col quale si separano le depressioni dal resto del manto stradale e si crea uno shapefile dedicatovi (Fig.71). Quest'ultimo lo si utilizza come maschera, così da ritagliare il file tif ricavato al paragrafo precedente (Fig.67-68) ed estrapolare le sole depressioni, visualizzate in "singleband pseudocolor" così da notare le diverse profondità (Fig.72). La scala colore varia dal blu (meno profondo) fino al rosso (più profondo), passando dal bianco.





Figura 71 – Visualizzazione delle sole depressioni stradali, zoom sull'incrocio centrale



Figura 72 – Visualizzazione in singleband pseudocolor, zoom sull'incrocio centrale

Le statistiche di quest'ultimo file sono:

STATISTICA	VALORE
Minimum value	-0.0997314453125 m
Maximum value	-0.010009765625 m
Range	0.0897216796875 m
Sum	-180.4990692138672 m
Mean value	-0.01446654397802895 m
Standard deviation	0.00437588195435275 m
Sum of the squares	0.2388947257512932 m <sup>2</sup>

Come espresso precedentemente, rilevanti sono i valori massimo e minimo riportati in metri.

Per controllare i risultati ottenuti dal procedimento precedente, si esegue un confronto tra le depressioni evidenziate tramite i passaggi in QGIS e immagini prese da 3 diverse fonti: Google Street

View, le ortofoto rilevate da Digtarca e processate dal SDG11 Lab nel 2022 e quelle rilevate dallo stesso nel 2023.

Si riportano solo quelle più evidenti in tutte e 3 le fonti di immagini, siccome in alcuni casi le ortofoto risultano troppo scure per notare le irregolarità del manto stradale.

- Frazione di via Principi d'Acaja tra gli incroci con via Susa e via Avigliana

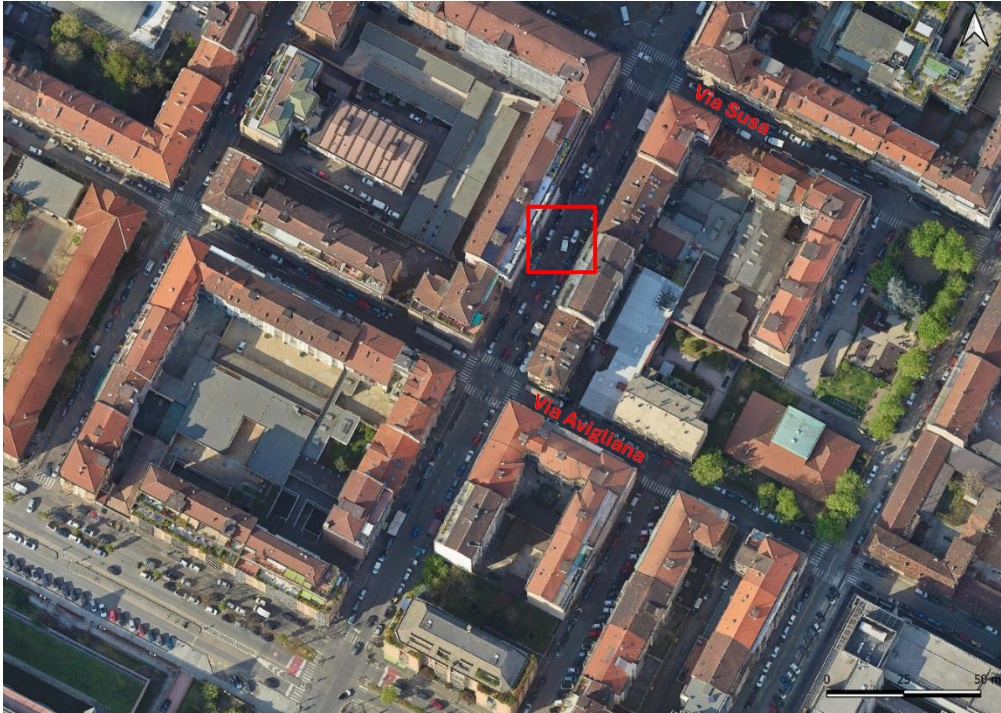


Figura 73 – Collocamento lungo il tratto stradale in esame

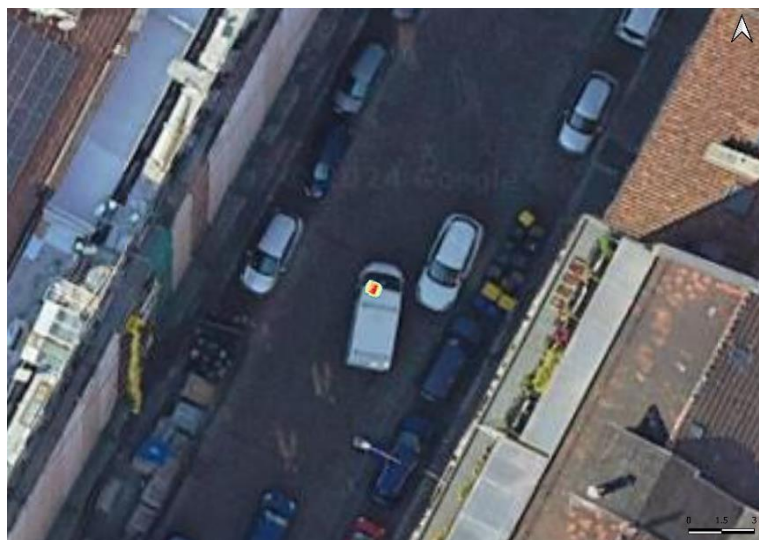
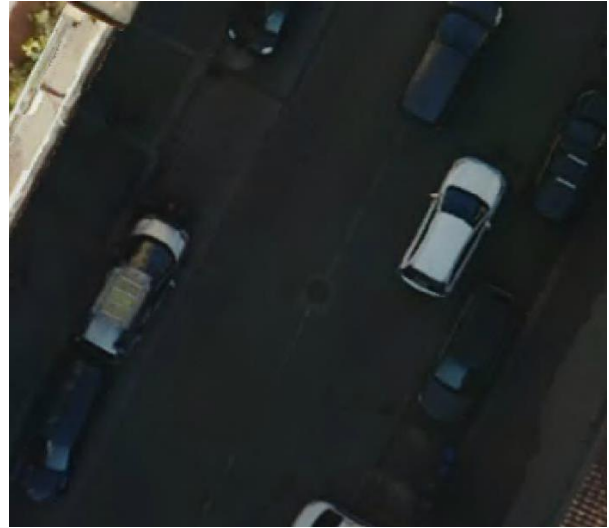


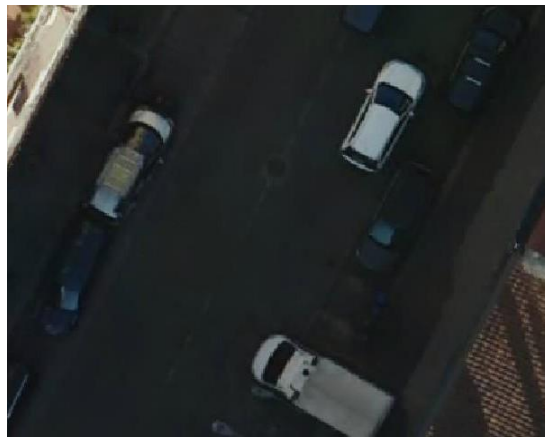
Figura 74 – Zoom sulla depressione per il confronto



Google Street View



Ortofoto 2022



Ortofoto 2023

*Figura 75 - Screenshot dell'area corrispondente al luogo della depressione stradale rilevata col procedimento in QGIS*



➤ Incrocio tra via Principi d'Acaja e via Giovanni Carlo Cavalli

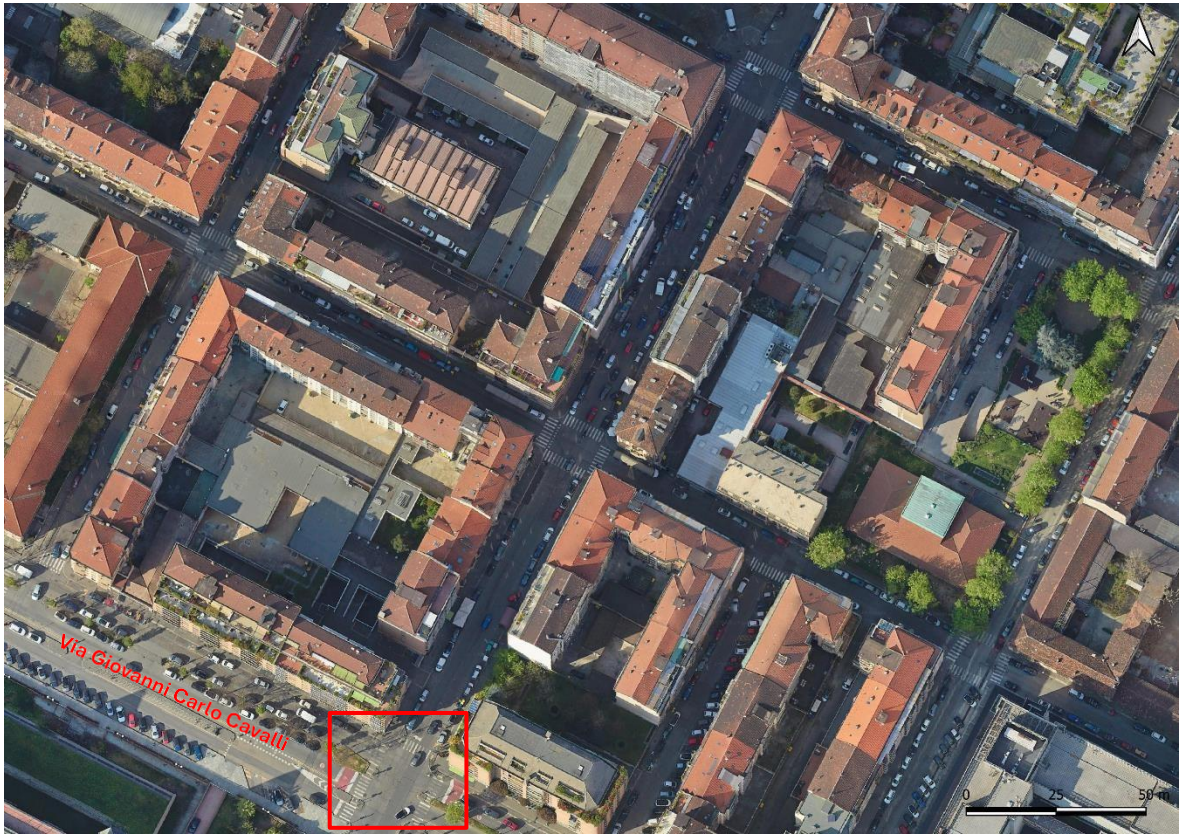


Figura 76 – Collocamento lungo il tratto stradale in esame

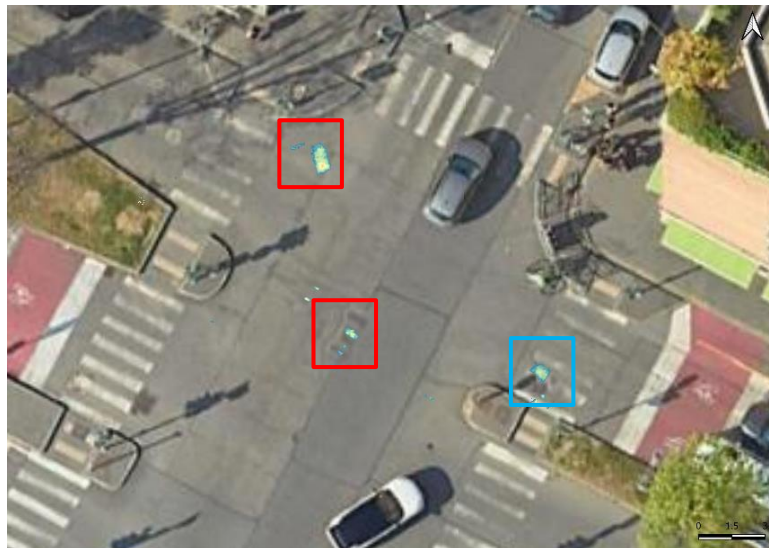


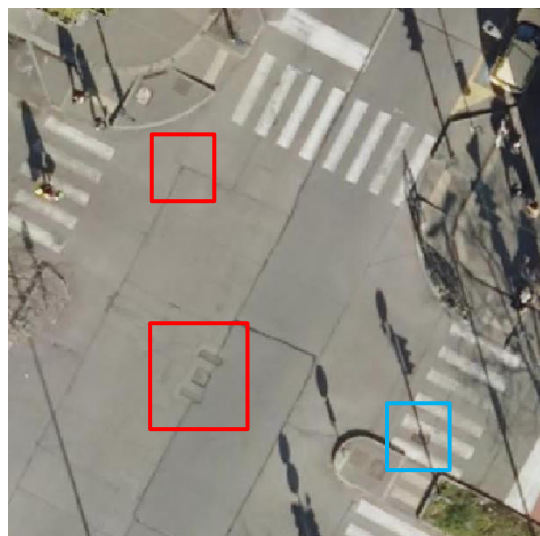
Figura 77 - Zoom sulle depressioni per il confronto



Google Street View



Ortofoto 2022



Ortofoto 2023

Figura 78 - Screenshot dell'area corrispondente al luogo delle depressioni stradali rilevate col procedimento in QGIS

In questo caso con Google Street View non ho potuto inquadrare tutte le irregolarità della strada per via della presenza di auto che le coprivano; perciò, ho riquadrato in azzurro l'unica visibile così da riuscire a localizzarla più comodamente anche tramite le altre immagini.

In conclusione, il procedimento utilizzato per il rilevamento delle irregolarità stradali può essere ritenuto valido in quanto si trova una corrispondenza nella realtà, individuabile in ben tre fonti. Purtroppo, non riconosce le crepe né dà in automatico una semantica ai dissesti individuati, è quindi utilizzabile per risultati grossolani.

## 3.2 APPROCCIO AUTOMATICO

Per poter iniziare a cercare una metodologia più efficace di valutazione della pavimentazione stradale è stato innanzitutto necessario restringere l'area ad un paio di strade, così da poter effettuare un sopralluogo di persona e iniziare a comprendere i parametri di valutazione utilizzati dai tecnici comunali, per poter successivamente passare anche ad un approccio pratico-operativo che rispettasse il loro operato.

Il sopralluogo è stato svolto il 29 ottobre 2024 e ha compreso i tratti di via Duchessa Jolanda e via Susa, limitate tra corso Ferrucci e il controviale di corso Inghilterra. Il percorso, partito quindi dall'angolo di Piazza Bernini con via Duchessa Jolanda, è stato seguito in macchina insieme all'ingegnere Michele Gizzo, facente parte dei tecnici comunali che si occupano della gestione del suolo, il quale spiegava come venivano considerate le condizioni dei vari tratti stradali che si presentavano, seguendo i criteri da loro utilizzati.

Il loro approccio per la valutazione delle condizioni di ammaloramento della pavimentazione stradale si basa su un'ispezione visiva condotta da esperti in materia quale, ad esempio, l'ingegnere sopra citato che ha accumulato anni di esperienza in questo campo, e una concomitante categorizzazione dei tratti stradali in funzione degli interventi che richiederebbero.

Al termine del sopralluogo si è convenuto di utilizzare una classificazione che suddividesse in 4 classi le condizioni stradali riscontrabili che, in ordine dalla condizione migliore alla peggiore, che rispecchiano interventi più o meno importanti, sono: buono/sufficiente, puntualmente degradato, degradato e molto degradato. Si è anche associata una scala di colori semaforica utilizzando il verde, il giallo, l'arancione e il rosso rispettivamente.

Il percorso del sopralluogo, con applicata la classificazione, risultava essere come riportato di seguito in Fig. 79.



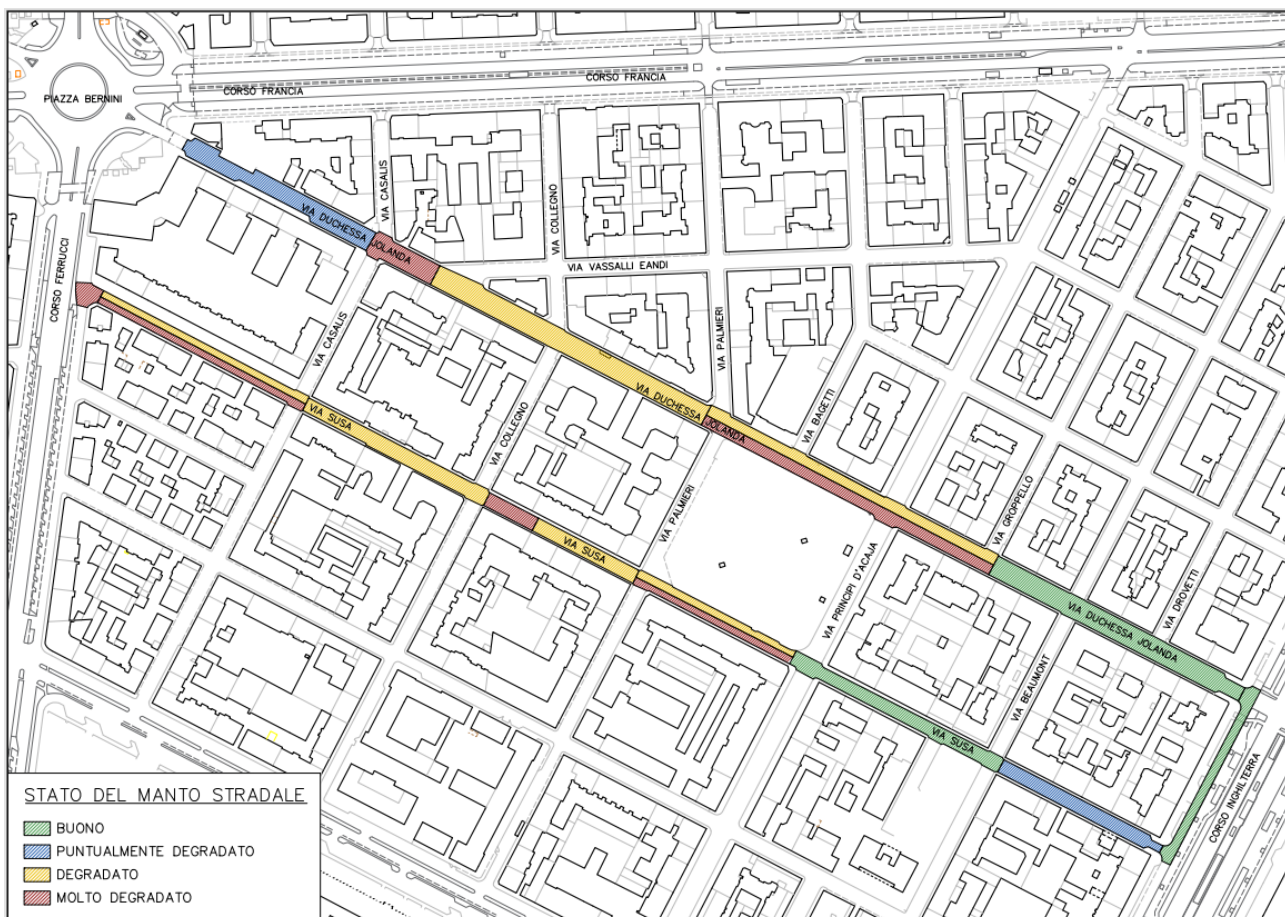


Figura 79 - Mappa elaborata dal Comune successivamente al sopralluogo svolto insieme il 29/10/2024

### 3.2.1 SOFTWARE LIDAR360MLS

Per la nostra analisi è stato inizialmente utilizzato il software *Lidar360MLS*, continuando poi sul software *QGIS*.

Il primo è stato utilizzato per effettuare un riconoscimento automatico dei dissesti e il calcolo del PCIndex, risultati poi usati per ulteriori passaggi effettuati col secondo software, che spiegherò in seguito.

Il software *LiDAR360MLS* è proprietà della GreenValley International Inc (GVI), un'azienda californiana leader nell'innovazione delle tecnologie di mappatura 3D.

*LiDAR360MLS* è un software di estrazione e analisi intelligente delle caratteristiche, che supporta l'elaborazione e l'analisi delle nuvole di punti *LiDAR* e delle immagini ottenute dai principali *MMS* sul mercato, quali quelli montati su veicoli, quelli portatili, oppure ancora quelli a zaino.

Il sistema possiede una catena di elaborazione completa, che copre l'intero processo dall'analisi dei dati delle nuvole di punti all'individuazione di beni GIS, dalla realizzazione di disegni architettonici alla mappatura vettoriale 3D, fino alla valutazione delle condizioni stradali, all'ispezione ferroviaria, all'inventario delle foreste urbane, alla creazione di gemelli digitali, alla produzione di mappe ad alta definizione e alla fornitura di altri risultati industriali.



Figura 80 – schema concettuale dalla raccolta dati al loro utilizzo passando tramite l'utilizzo del software

Per quanto riguarda l'analisi delle condizioni stradali, di interesse di questo elaborato, le sue funzioni sono numerose, in generale:

- Rilevamento dei danni alla pavimentazione basato sull'intelligenza artificiale (Fig.81) e supporto per il calcolo dell'indice PCI (Pavement Condition Index);
- Fusione di dati multi-sorgente per il riconoscimento dei danni stradali;
- Metodi di analisi spaziale 3D, come l'analisi dello spazio aperto, del panorama, del limite di altezza dei ponti, la simulazione della collisione dei veicoli, l'ispezione ferroviaria, ecc;
- Analisi delle sezioni stradali, confronto e analisi dei dati multifase e generazione di rapporti di confronto standard;
- Generare terreni di alta precisione basati sui punti chiave della sezione trasversale, operare l'analisi della sezione stradale e il calcolo dei parametri;
- Calcolo di vari parametri della sezione stradale per assistere l'analisi previa costruzione di strade e di altre operazioni.

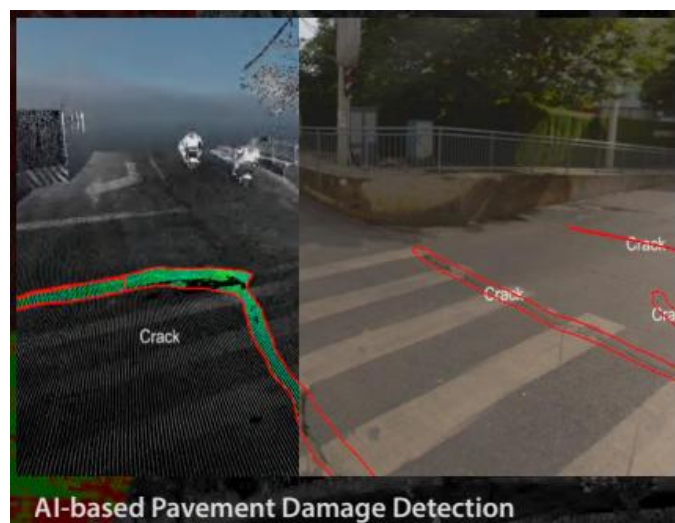


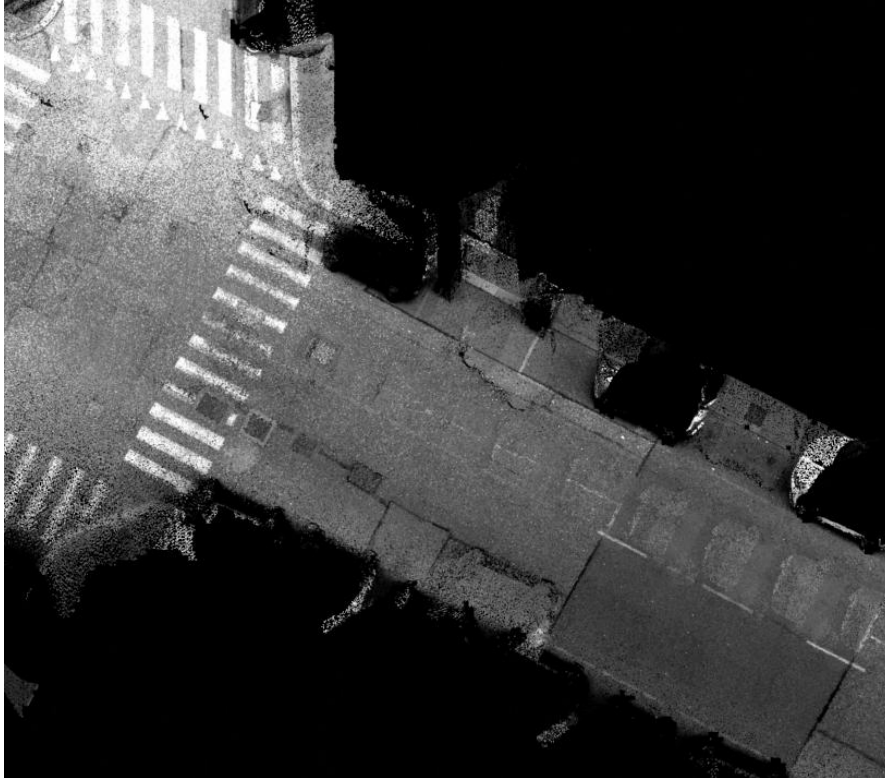
Figura 81 – Rilevamento ammaloramenti pavimentazione stradale

Nelle sezioni successive si riporta quindi l'utilizzo che si è fatto di questo strumento.

### 3.2.2 PASSAGGI INIZIALI APPROCCIO AUTOMATICO

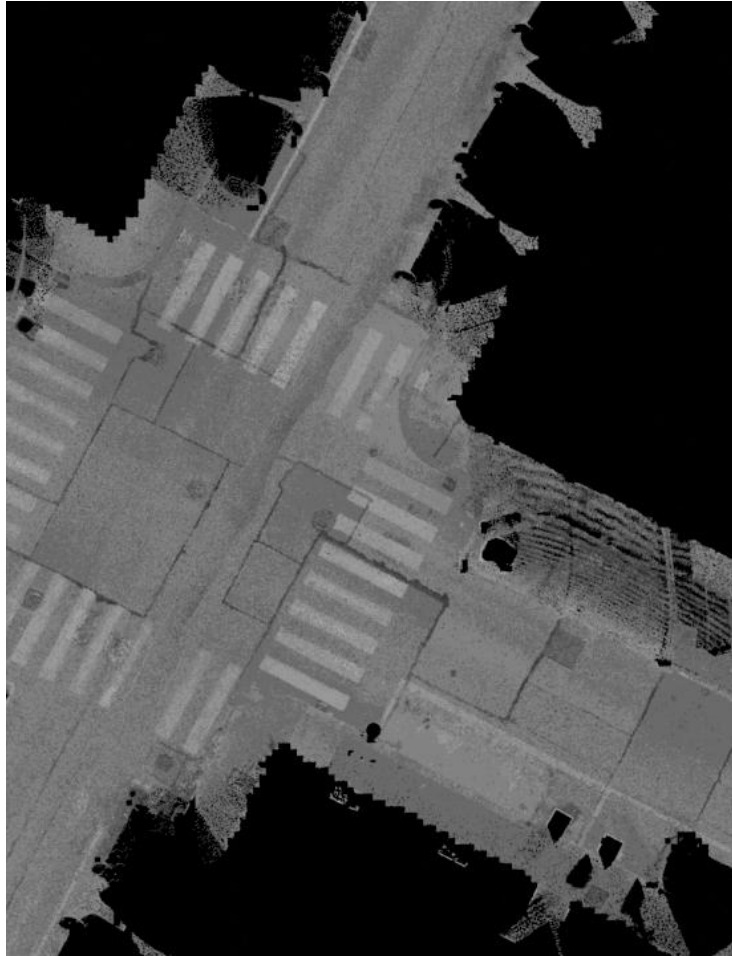
L'analisi sul Lidar360MLS è possibile avendo a disposizione la nuvola di punti dell'area di interesse.

Essendo una nuvola di punti fitta, con una densità di 1100 punti/mq, si può notare l'accuratezza con cui si vede la strada (Fig. 82,83,84,85), questa è infatti di 10 mm.

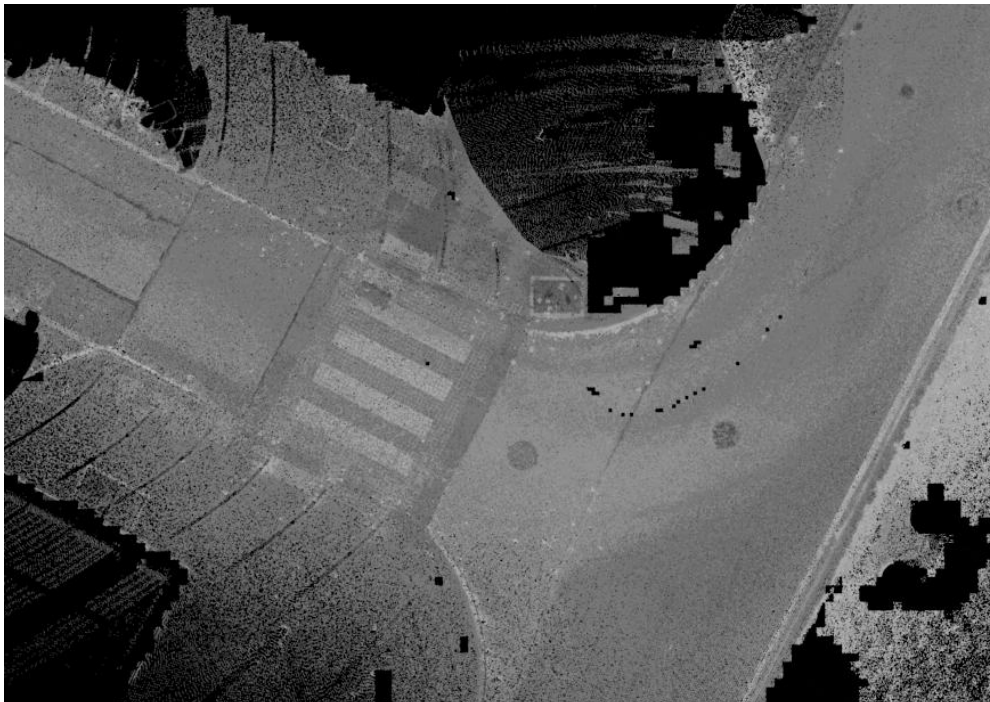


*Figura 82 – Un tratto di via Duchessa Jolanda*

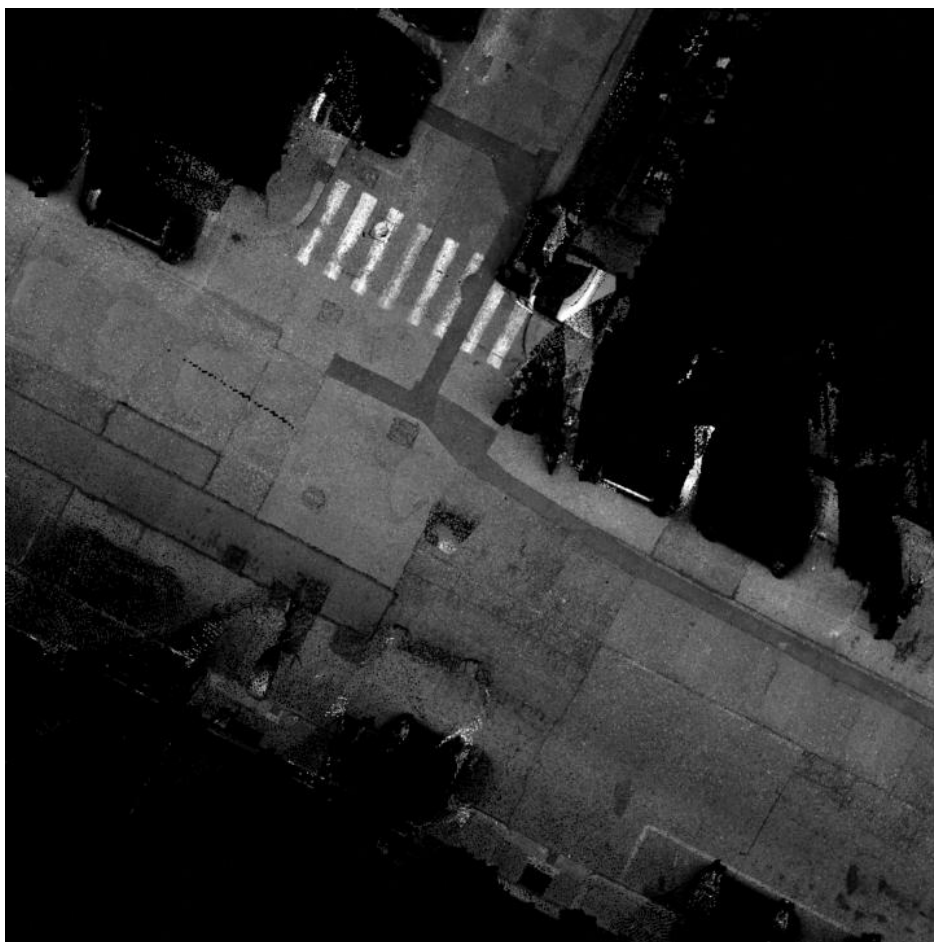




*Figura 83 – Incrocio tra via Susa e via Beaumont*



*Figura 84 – Incrocio tra via Susa e corso Inghilterra*



*Figura 85 – Incrocio tra via Duchessa Jolanda e via Gropello*

Inserendo con un apposito comando le “*Lane Lines*” (linee di mezzzeria) e impostando la larghezza dell’area da analizzare che corrisponda allo spazio occupato dalla carreggiata stradale, si può mandare un processo di analisi, attuato direttamente sulla nuvola di punti, che in automatico localizza e riconosce i dissesti tramite il comando “*Detect Damage*” (Fig.86).

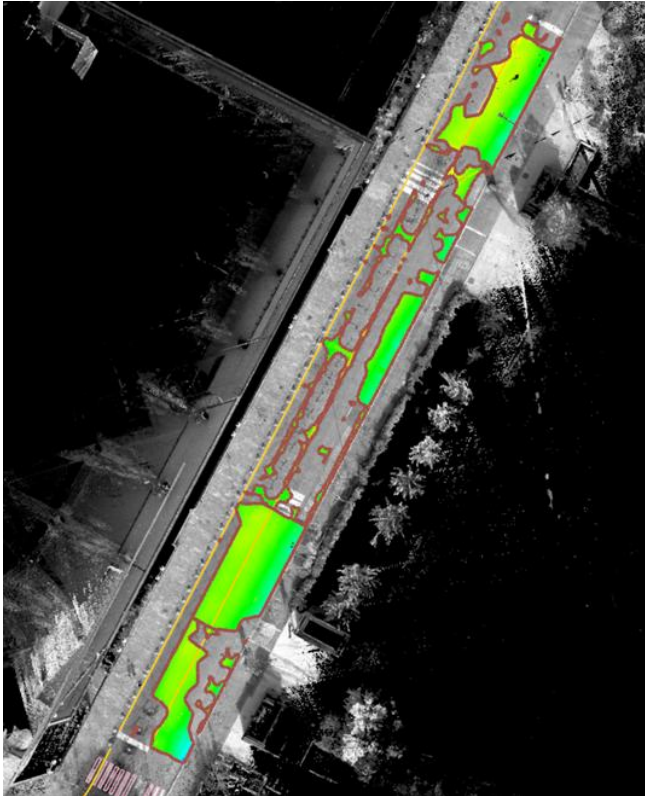
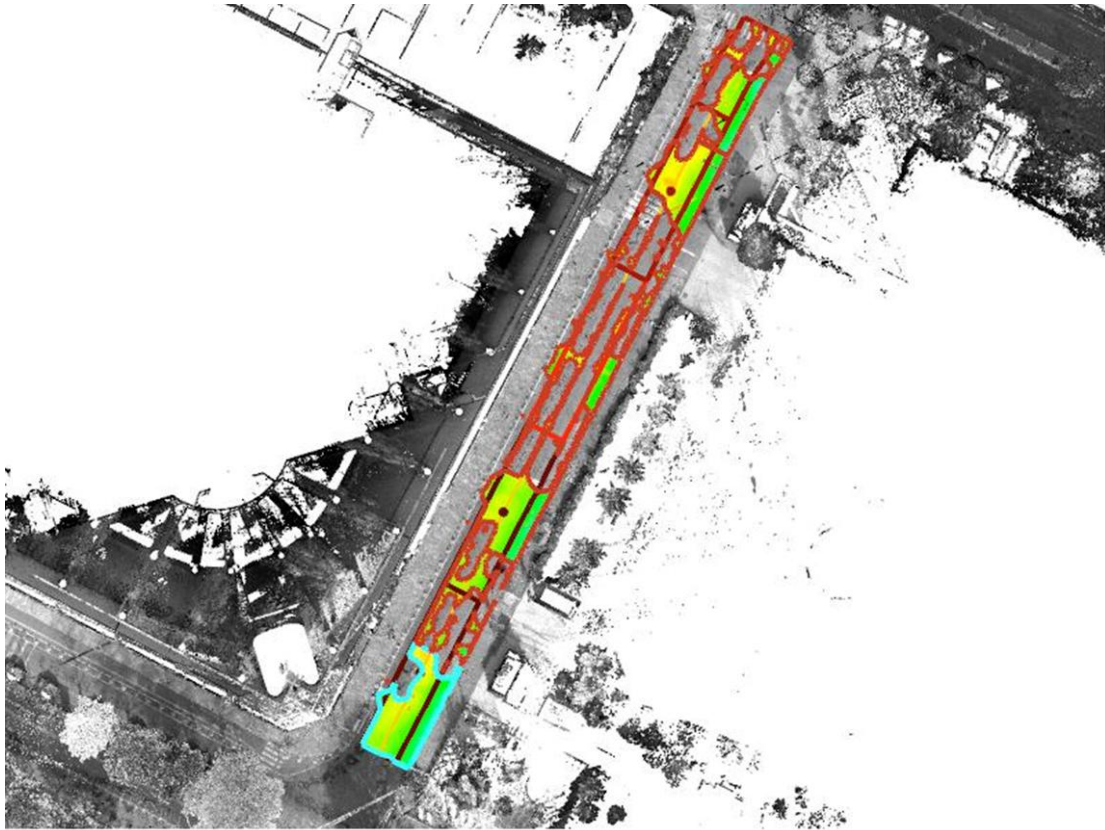


	Image	Damage Type	Length
4	NULL	Crack	1.882894
5	NULL	Rutting	22.012432
6	NULL	Crack	0.725993
7	NULL	Rutting	0.826611
8	NULL	Rutting	20.913586
9	NULL	Corrugation	17.636230
10	NULL	Corrugation	20.720598
11	NULL	Depression	2.778718
12	NULL	Corrugation	2.036150
13	NULL	Rutting	1.041594
14	NULL	Bump	0.476512
15	NULL	Rutting	20.661417
16	NULL	Corrugation	20.578537
17	NULL	Crack	6.054703
18	NULL	Rutting	1.005793
19	NULL	Depression	0.580696

Figura 86 – Esempio risultato dall'utilizzo del comando "detect damage" su un tratto stradale, partendo dal caricamento della nuvola di punti sulla sinistra; a destra la tabella attributi annessa che presenta tipologia e caratteristiche dei danni individuati.

Si procede poi facendo calcolare l'indice PCI al software (Fig.87) che dà una valutazione delle condizioni della pavimentazione secondo una sua classificazione (Fig.88). Si può inoltre notare come riporti anche l'area e la posizione di ogni blocco con l'annessa valutazione.



Pavement Name	Position(m)	Area(sqM)	Block Number	PCI Average	PCI Level
Road1	394559,869,4991683,178,248,944	1022	5	29	Very Poor(5)

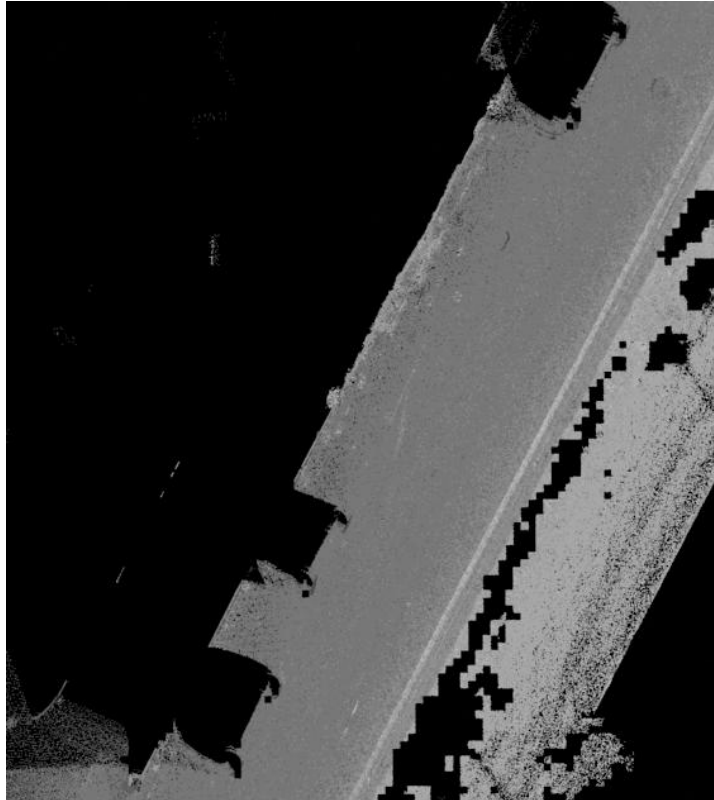
Figura 87 – Esempio risultato dopo il calcolo del PCI



Figura 88 – Classificazione e colori collegati al valore del PCI

Purtroppo, si sono riscontrati vari problemi, quali macchine in doppia fila che impedivano l'analisi completa della strada (Fig.89,90), tombini riconosciuti come buche, incroci individuati come aree di "Rutting", probabilmente per via delle inclinazioni diverse portate dall'incontro di più strade.





*Figura 89 – Macchine ferme a bordo strada, al di fuori dei parcheggi; Corso Inghilterra*



*Figura 90 – Macchina in doppia fila*



## 4. COLLAUDO DEI DATI ESTRATTI CON I TECNICI DEL COMUNE DI TORINO

Non potendo utilizzare, a livello pratico, il risultato dato dal software in quanto con troppe classi di severità e tratti di 250 mq, non corrispondenti alla reale geometria stradale, si è portata avanti l'analisi sul software QGIS. Questo è stato possibile grazie al fatto che i risultati sul Lidar360MLS sono esportabili come vettori georeferenziati e perciò utilizzabili sul GIS. Si esportano le "Damage Region", ovvero i risultati dell'analisi automatica del software, che riportano le tipologie di dissesti e i livelli di PCI per i vari tratti nella tabella attributi.

Per ovviare al problema della geometria suddivisa in blocchi di 250 mq, si era inizialmente scelto di unirli per ottenere tutti i tratti stradali separati dagli incroci, e dividere anche le strade in semicarreggiate. Risultava poi necessario avere un unico valore di PCI per ogni elemento, si è perciò attuata una media degli indici presenti in ogni tratto.

Dopo alcuni incontri con i tecnici comunali, si è convenuti a una scala qualitativa di 4 classi per la suddivisione delle condizioni della pavimentazione stradale, si è reso quindi necessario creare una simbologia, con annessi i colori precedentemente scelti, nella quale ad ogni campo è stato associato un range di valori di PCI, visibile in Tabella 11. In Fig.91. si riporta anche il primo risultato riguardante l'area del sopralluogo.

Tabella 11 – Scala qualitativa individuata per categorizzare le condizioni stradali

CLASSE	RANGE DI PCI	COLORE
<b>Buono/Sufficiente</b>	70<PCI<100	Verde
<b>Puntualmente degradato</b>	40<PCI<70	Giallo
<b>Degradato</b>	10<PCI<40	Arancione
<b>Molto degradato</b>	0<PCI<10	Rosso



*Figura 91 – Primo risultato ottenuto per la sola area del sopralluogo*

Essendo che questa geometria non rispetta quella reale si è unito il vettore dei risultati con quello della carta di circolazione veicolare gentilmente inoltrata dal CSI (Consorzio per il Sistema Informativo), così da avere i valori di entrambi i file nella tabella attribuiti ma mantenendo la geometria dettagliata della strada (Fig.92).

Il CSI-Piemonte è un consorzio di Enti pubblici che opera dal 1977 nell'ambito dell'informazione e della comunicazione inerenti ad aree di intervento pubbliche. Tra le soluzioni tecnologiche che adotta si ritrovano banche dati, infrastrutture di rete, sistemi informativi e servizi web.





Figura 92 – Risultato ottenuto unendo la geometria della carta di circolazione veicolare del CSI

Avendo operato questa unione, in molti tratti risultavano tratti sovrapposti con valori di PCI diversi, per via del fatto che dei tronchi stradali finivano dove nel precedente risultato era già iniziato un incrocio, ad esempio, o viceversa (Fig.93).

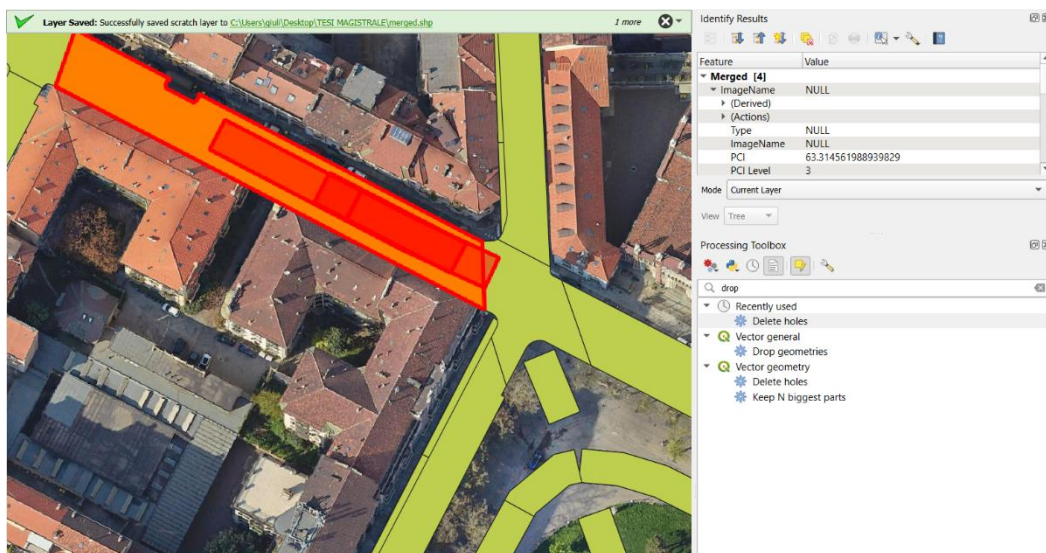


Figura 93 – Sovrapposizione elementi

Per ovviare a ciò è stato necessario operare direttamente sulla tabella attributi, eliminando i tratti doppianti a cui era stato affibbiato un valore di PCI appartenente a un altro elemento, e si è inoltre dovuto



fare una media dei PCI delle semicarreggiate che si erano precedentemente istituite. La scelta di non mantenere le semicarreggiate è stata fatta per poter semplificare e snellire il processo, essendo poi questo da estendere ad aree più ampie, e si è quindi convenuti all'utilizzo della geometria già in possesso del Comune senza attuare cambiamenti al momento.

Il risultato dopo aver corretto la tabella attributi è visibile in Fig.94.



Figura 94 – Risultato corretto; mappa tematica inerente solo l'area del sopralluogo del 29/10/24

Si possono notare ancora delle discordanze rispetto alla Fig.79. Questo è dovuto in parte al fatto che dei tratti sono stati rifatti da poco, come quello cerchiato in rosso in Fig.94, che infatti si ritrova verde in Fig.79, in parte ad effettivi errori di valutazione del software Lidar360MLS come quelli precedentemente evidenziati.

Un ulteriore problema riguarda la geometria della carta di circolazione veicolare inoltrataci, in quanto presenta in alcune parti dei tratti eccessivamente lunghi in cui la valutazione del PCI va a perdere di significato in quanto non può risaltare l'effettivo stato in cui verge il manto stradale. Un esempio è riportato in Fig.94 cerchiato in azzurro, si nota come non vi è la separazione dei tronchi in corrispondenza degli incroci "a T".

Questo risultato, in ogni caso, ha iniziato già ad essere in una forma più utile al Comune in quanto, come da loro evidenziato in uno degli incontri, è essenziale per loro avere una geometria che rispecchi la realtà così da avere anche un'idea più accurata della superficie interessata dagli eventuali lavori manutentivi da attuare. Inoltre, si è riusciti a calibrare i nostri valori nelle categorie richieste, così che effettivamente i risultati possano essere da loro utilizzati per programmare gli interventi e avere una stima dei costi.

## 5. ELABORATI FINALI

In questo capitolo si riportano i passaggi che han portato alla produzione dei risultati finali, approvati dai tecnici comunali nell'ultimo incontro, con annessa una stima dei costi di manutenzione per l'area di interesse in base alle condizioni in cui si presenta. Infine, si riportano alcune criticità non eliminate, suggerendo alcune soluzioni.

### 5.1 MAPPA TEMATICA DELL'AREA DI CIT TURIN

Appurate le problematiche del metodo riportato precedentemente, si è scelto di cambiare un po' la procedura di analisi.

Innanzitutto, si è riusciti a caricare le immagini sul software Lidar360MLS, oltre alla nuvola di punti. Questo ha permesso di effettuare l'analisi automatica direttamente su di esse, il che permette una verifica più veloce e precisa.

Il software Lidar360MLS dà la possibilità di caricare le immagini tramite l'inserimento della nuvola di punti e di un file "imagelist", che contiene i valori per la geolocalizzazione delle singole immagini contenute nella stessa cartella. Essendo elevato il numero di immagini, e dato che si può caricare una sola imagelist alla volta, si è scelto di accorpate i dati delle immagini in 5 imagelist differenti e perciò operare su 5 progetti separati sul software, così da velocizzare, per quanto possibile, le analisi automatiche da far effettuare.

La creazione di questi file "imagelist" unici è stata effettuata, per snellire il processo, tramite il software *Matlab* come riportato di seguito, avendo preparato precedentemente 5 cartelle che raccogliessero le immagini e le singole imagelist per le 5 zone. La procedura riportata è quella svolta per la quinta cartella, naturalmente è stata svolta per tutte le cartelle.

Innanzitutto, si specifica la cartella che contiene i file imagelist (estensione .csv)

```
folderPath= uigetdir('imagelist05')
```

```
folderPath = 'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_MMS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'
```

Ottingo la lista di tutti i file nella cartella

```
listafiles = dir([folderPath, '/*.csv']); %lista dei contenuti della cartella;  
usa concatenazione manuale  
s=struct(listafiles)
```

```
s = 39x1 struct
```

Fields	name	folder	date	bytes	isdir	datenum
1	'Record001, Record001, LB6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_MMS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic-2024 13:19:46'	38961	0	7.3959e+05
2	'Record002, Record002, LB6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_MMS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic-2024 13:19:54'	16945	0	7.3959e+05



Fiel ds	name	folder	date	byt es	is dir	datenu m
3	'Record003, Record003, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:03'	396 89	0	7.3959 e+05
4	'Record004, Record004, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:10'	218 39	0	7.3959 e+05
5	'Record005, Record005, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:17'	322 55	0	7.3959 e+05
6	'Record006, Record006, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:23'	313 59	0	7.3959 e+05
7	'Record007, Record007, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:31'	197 60	0	7.3959 e+05
8	'Record008, Record008, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:38'	305 98	0	7.3959 e+05
9	'Record009, Record009, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:48'	370 38	0	7.3959 e+05
10	'Record010, Record010, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 20:58'	421 49	0	7.3959 e+05
11	'Record011, Record011, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 21:07'	208 73	0	7.3959 e+05
12	'Record012, Record012, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 21:16'	662 5	0	7.3959 e+05
13	'Record013, Record013, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 21:24'	249 03	0	7.3959 e+05
14	'Record015, Record015, L B6, ladubug6.csv'	'Z:\DATI_DIGITARCA\EXPORT_CAMERADATA_TORINO_M MS\EXPORT_TORINO_05\imagelist05'	'06-dic- 2024 13: 21:33'	237 37	0	7.3959 e+05
:						

```
filelist={s.name}; %cell array coi nomi dei file
```

Inserisci la pre-allocazione per il file risultante

```
combinato05=[];
```

Fai operare un ciclo su tutti i file

```
for i=1:length(filelist)
    filePath=[folderPath, '/', filelist{i}]; %costruisci il percorso completo del
file
    fileData=readcell(filePath); %leggi il file
    if i==1
        combinato05=fileData; %mantieni tutto il primo file
    else
        combinato05 =[combinato05; fileData(2:end,:)]; %dal secondo in avanti
togli la prima riga e concatena verticalmente
    end
end
```

Si elimina la prima riga dai file successivi al primo perché sono i nomi dei campi, che servono solo una volta all'inizio del file.

Specifichi il nome del file in uscita e salvi il file combinato.

```
outputfile=[folderPath, '/combinato05.csv'];
writecell(combinato05,outputfile); %il file unito lo salvo come combinato05.csv
nella stessa cartella con writecell

display([combinato05]) %per mostrare il risultato
```

combinato05 = 3318x17 cell

	1	2	3	4	5	6	7	...
1	'Timestamp'	'Filename'	'Origin (Easting[m]'	'Northing[m]'	'Height[m]'	'Direction (Easting'	'Northing'	
2	4.6245e+04	'231028_125043179.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0296	0.1467	0.9889	
3	4.6247e+04	'231028_125045047.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0285	0.1496	0.9884	
4	4.6248e+04	'231028_125046045.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0217	0.1521	0.9881	
5	4.6249e+04	'231028_125046768.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0056	0.1530	0.9879	
6	4.6249e+04	'231028_125047377.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	254.9984	0.1537	0.9878	
7	4.6250e+04	'231028_125047921.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0025	0.1537	0.9878	
8	4.6250e+04	'231028_125048427.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0183	0.1545	0.9877	
9	4.6251e+04	'231028_125048943.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0240	0.1553	0.9876	

	1	2	3	4	5	6	7	...
10	4.6251e+04	'231028_125049459.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0239	0.1553	0.9876	
11	4.6252e+04	'231028_125049951.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0139	0.1500	0.9884	
12	4.6252e+04	'231028_125050420.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	255.0027	0.1397	0.9899	
13	4.6253e+04	'231028_125050888.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	254.9987	0.1309	0.9911	
14	4.6253e+04	'231028_125051385.jpg'	3.9416e+05	4.9918e+06	254.9968	0.1271	0.9916	
	⋮							

Si riporta in Fig.95 la schermata in cui si vedono i dissesti riconosciuti in maniera automatica, dove si può notare anche la suddivisione nelle due visualizzazioni, a sinistra la nuvola di punti, a destra le immagini correttamente caricate tramite l'inserimento iniziale di una delle imagelist create precedentemente.

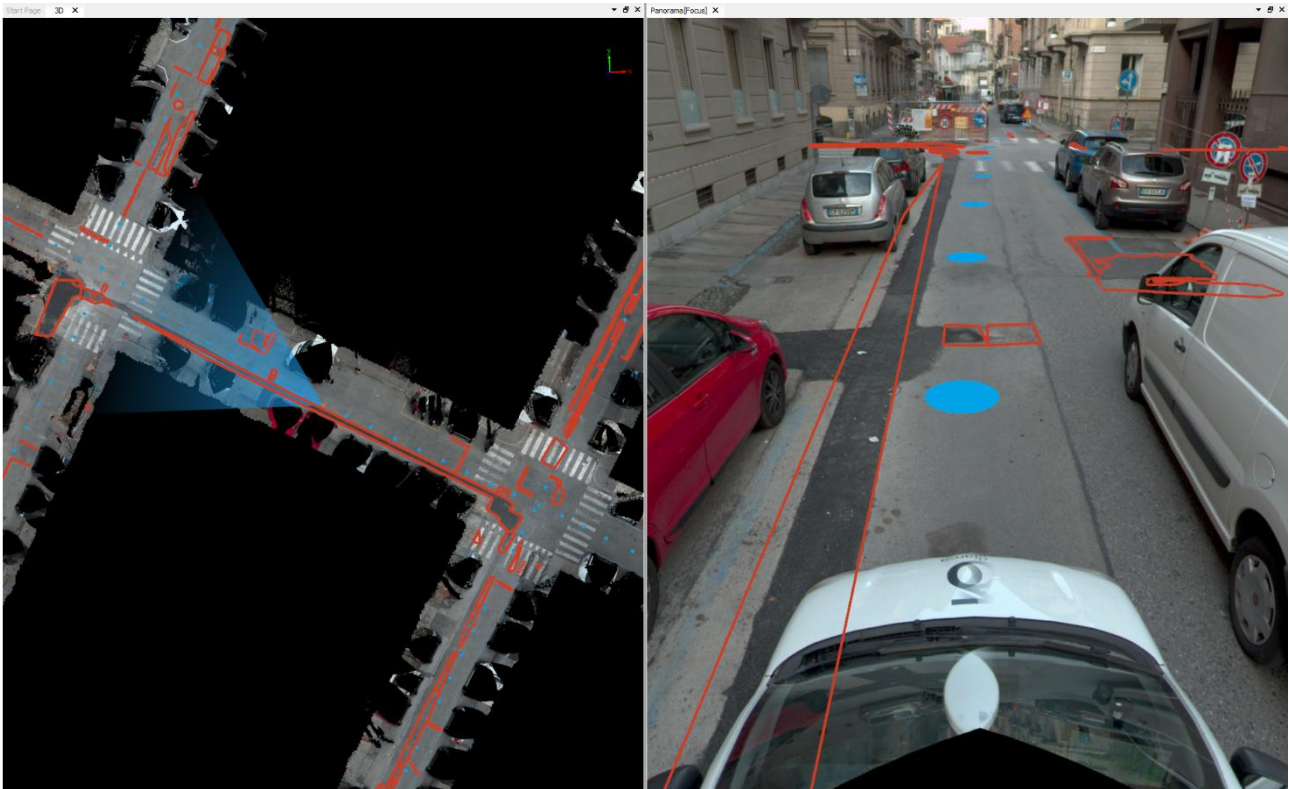


Figura 95 – Riconoscimento automatico dei dissesti operato dal software; a sinistra la visualizzazione tramite nuvola di punti, a destra tramite immagini

Alcuni errori rimangono anche in questo caso, ma risultando più agevole la loro correzione in quanto meglio visibili e in minor quantità, si è proceduto ad una modifica manuale.

Le problematiche in questo caso risultavano essere i tombini ancora riconosciuti come buche, della segnaletica stradale riconosciuta come dissesto (Fig.96) e alcune ragnatele (molte crepe interconnesse) non venivano automaticamente rilevate.

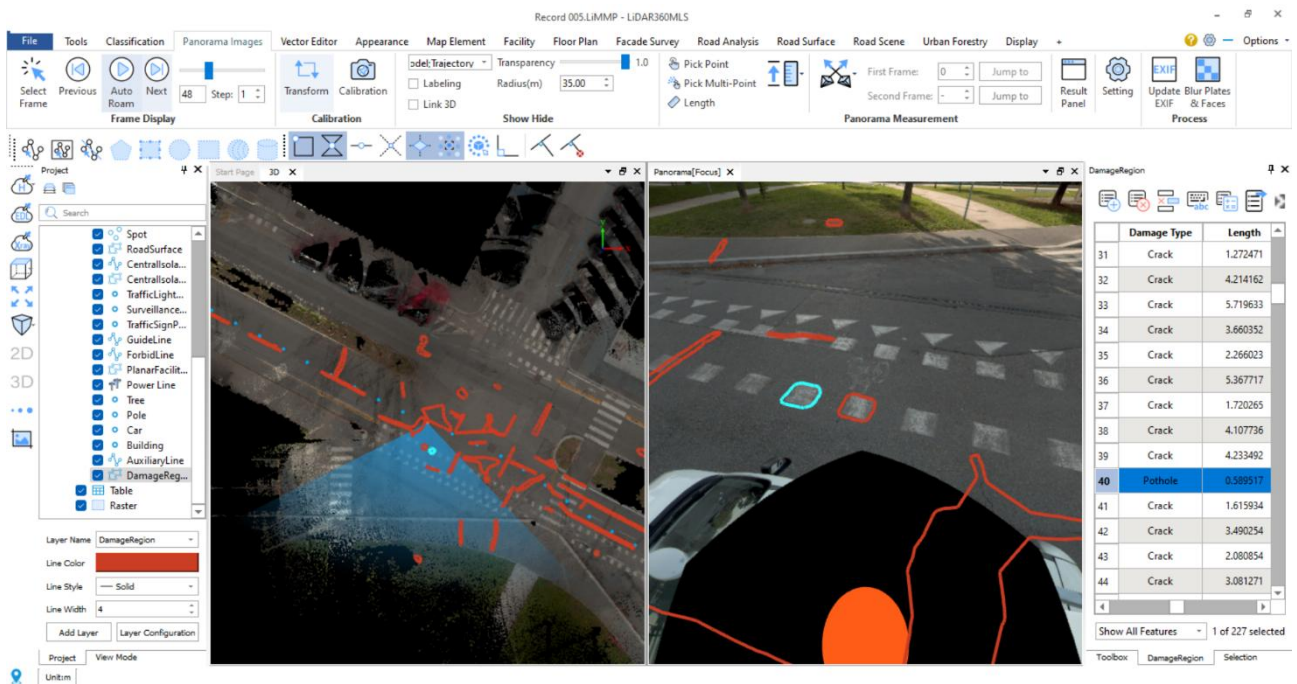


Figura 96 – Esempio errore nel riconoscimento dei dissesti; tabella attributi sulla destra della schermata

La correzione manuale di questi errori è stata operata intervenendo sulla tabella attributi del vettore “Damage Region” (Fig. 96), opportunamente eliminando il riconoscimento errato o modificando la tipologia del danno “Damage Type”. Se, invece, l’errore non era stato proprio rilevato si è proceduto ad un’aggiunta manuale tramite il comando “Damage Editor”, che permette di specificare la tipologia di dissesto e la rispettiva severità quando lo si va ad inserire (Fig.97).

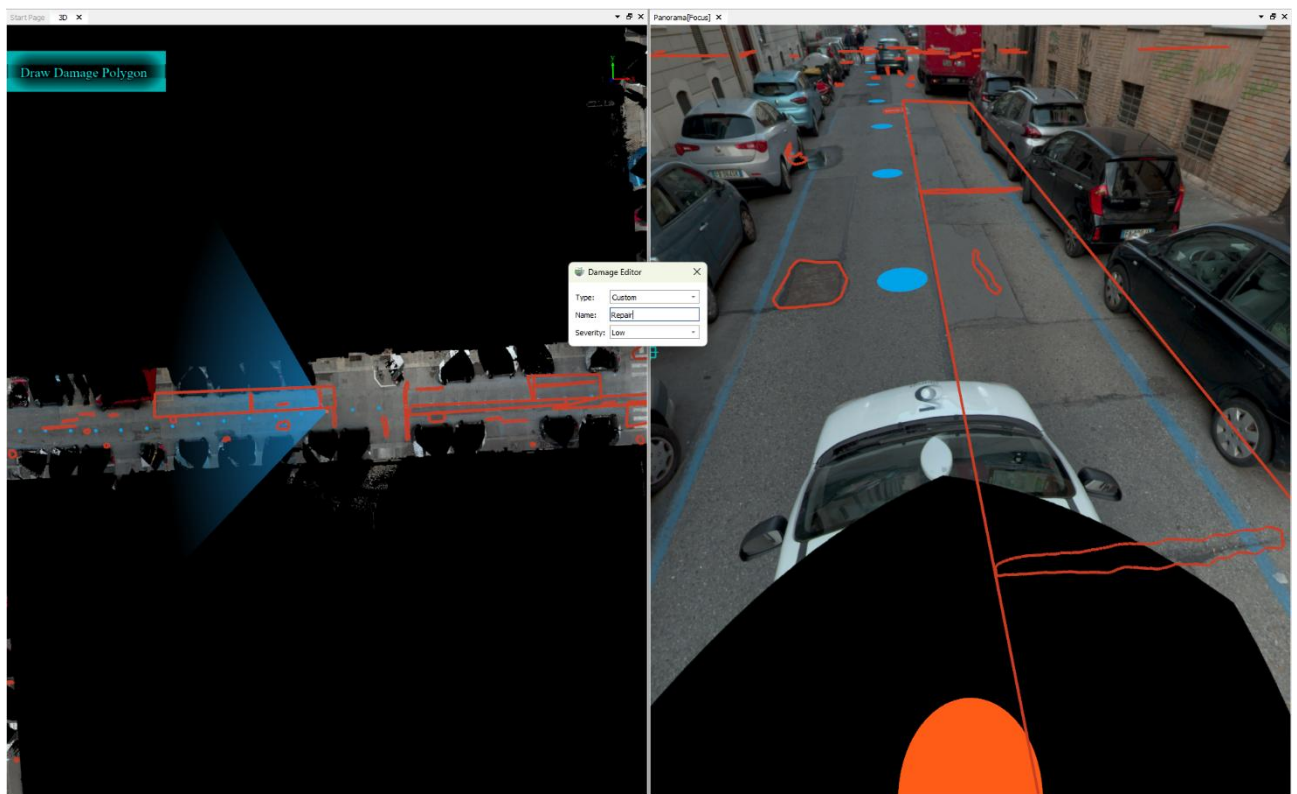


Figura 97 – Comando Damage Editor per inserire manualmente i dissesti



In questo caso si è aggiunto un “Repair”, si notano infatti una serie di rattoppi non riconosciuti automaticamente per i quali si è aggiunto un rettangolo (visibile sulla destra dell’immagine) per delimitarli.

A correzioni avvenute per ognuno dei 5 progetti in cui è stata suddivisa l’area di Cit Turin, si è proceduto al calcolo del PCI. I risultati sono visibili nelle Figure 98,99,100,101,102, nelle quali si notano anche i colori dati in automatico dal software in base alla scala precedentemente riportata nel paragrafo 3.2.2 Fig. 88.



Figura 98 – Risultato del calcolo del PCI



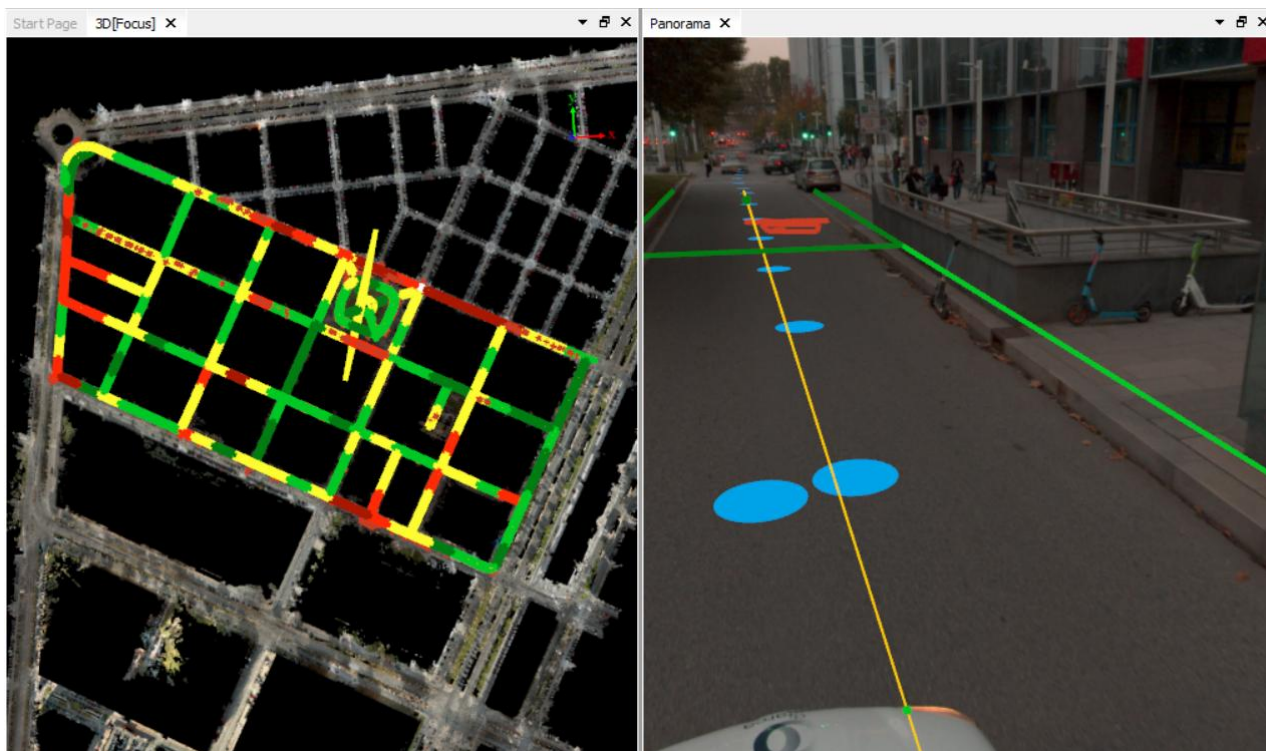


Figura 99 – Risultato del calcolo del PCI

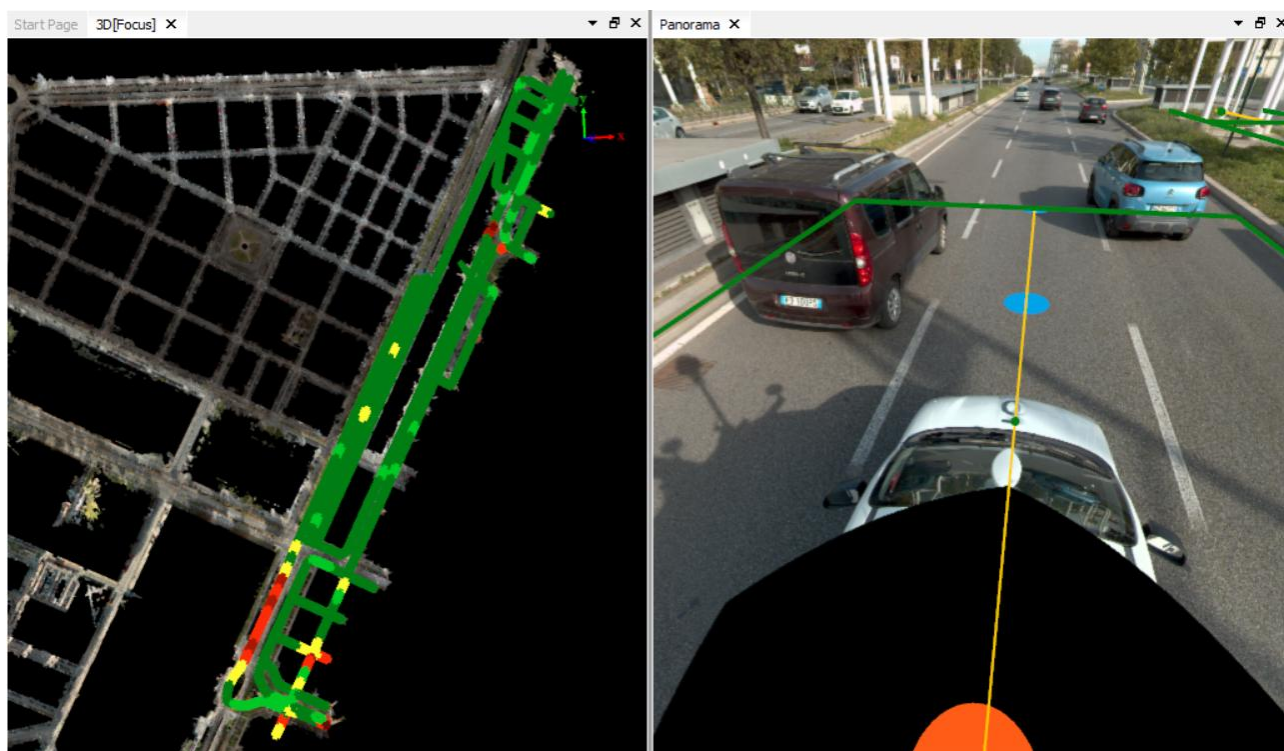


Figura 100 – Risultato del calcolo del PCI

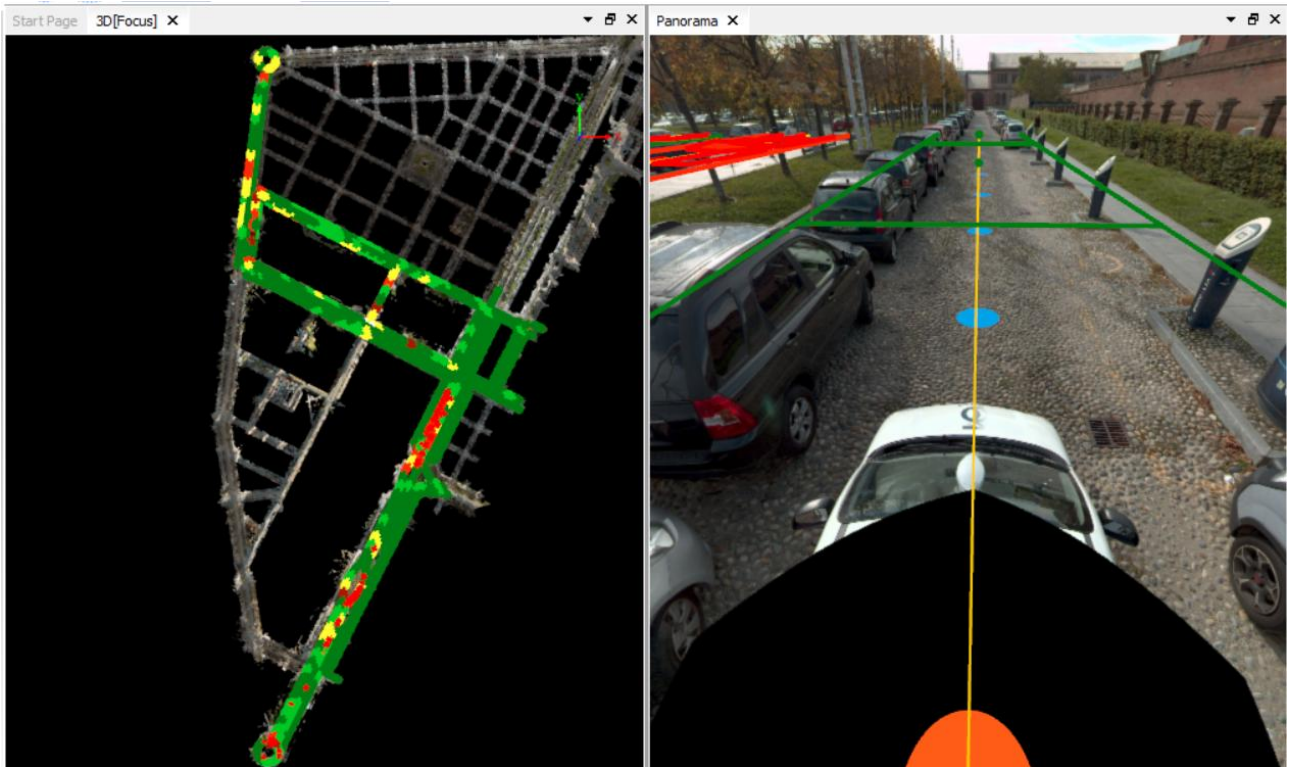


Figura 101 – Risultato del calcolo del PCI

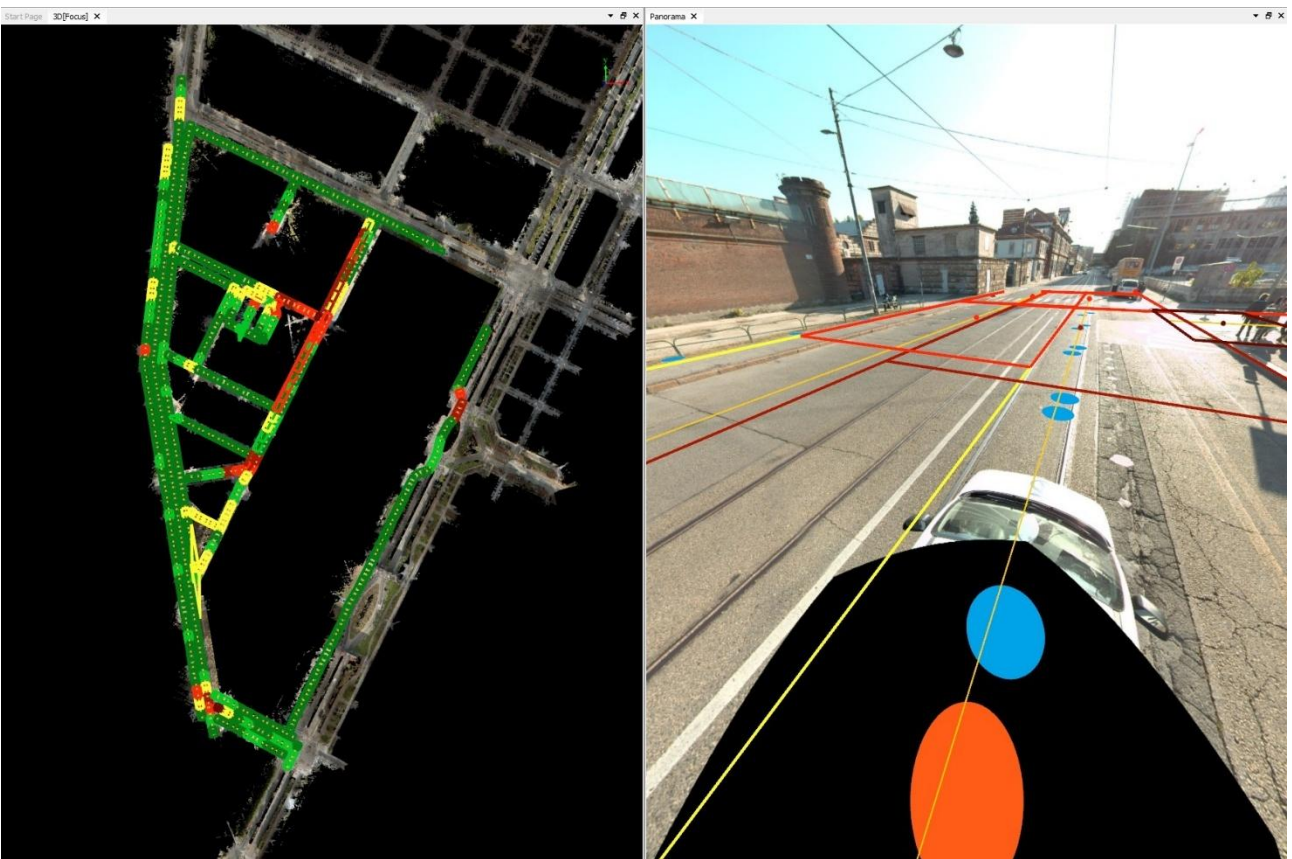


Figura 102 – Risultato del calcolo del PCI



L'errore in Fig.99, dove si riconosce Piazza Benefica, è solo un buco nella geometria, corretta velocemente una volta passati i risultati sul GIS.

I risultati riportati in QGIS sono visibili in Fig.103 in azzurro.



*Figura 103 – Trasferimento dei risultati delle 5 parti del software Lidar360MLS in QGIS*

Ora, come nella prova precedente, è necessario unire i valori presenti nella tabella attributi mantenendo la geometria della carta di circolazione veicolare (in verde). Questo è stato fatto tramite il comando “join attributes by location”, la cui finestra di comando è riportata in Fig.104.

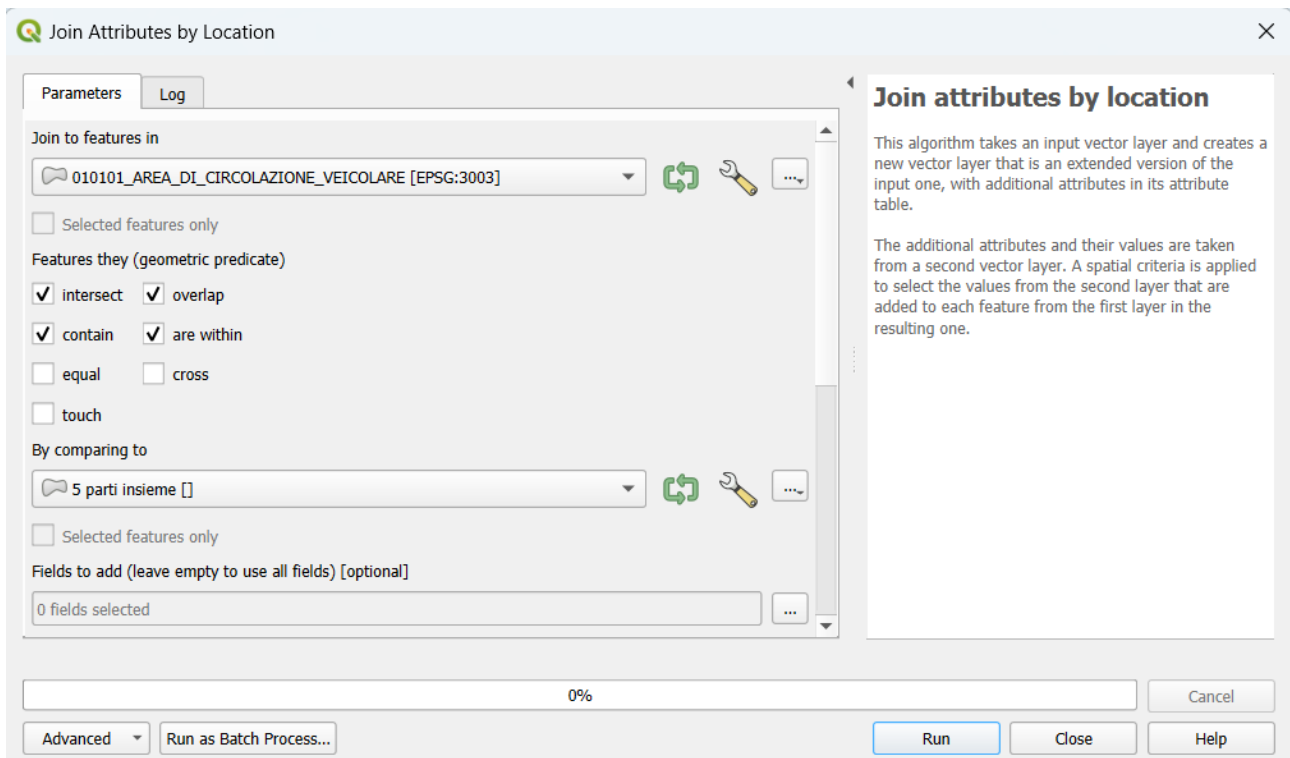


Figura 104 – Tool usato per l'unione delle geometrie tra gli shapefiles

Nella finestra si sono inseriti i due shapefile da unire, ovvero la carta di circolazione veicolare vista in Fig.103 in verde e i risultati dell'analisi del software Lidar360MLS in azzurro, spuntando i criteri con i quali operare l'unione.

La tabella attributi risultante è riportata in Fig.105, cerchiando in verde i valori derivanti dalla carta di circolazione veicolare, in azzurro quelli inerenti all'analisi automatica.

CIT_AR	CODICE_CEN	SUPERFICIE	ZONA	FONDO	SEDE	LIVELLO	PCI	Area	prodotto	PCI_2	Area_2	prodotto_2	MEDIA	
178	496437	VEI09	245.16	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	71.6172781458...	900.000000000...	64455.5503312...	71.617278
179	496440	VEI01	403.00	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	71.0442242563...	1296.54426574...	92246.8940838...	71.148280
180	496441	VEI01	40.21	tronco ordinario	pavimentato con materiale lap...	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	74.0425275165...	450.000000000...	33319.1373824...	74.042528
181	496442	VEI09	69.69	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	62.8816681723...	450.000000000...	28296.7506775...	62.881668
182	496443	VEI09	476.41	parcheggio	pavimentato con materiale lap...	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	89.6805140092...	1746.54426574...	157762.116554...	90.328152
183	496447	VEI01	336.86	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	90.0866119173...	675.000000000...	60808.4630442...	90.086612
184	496451	VEI01	325.61	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	74.1636266876...	675.000000000...	50060.4480141...	74.163627
185	496453	VEI09	4402.72	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	87.4416392047...	1800.000000000...	157394.950568...	NULL	NULL	NULL	87.441639
186	496464	VEI09	2947.20	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	75.2253092916...	1350.000000000...	101554.167543...	100.000000000...	1125.000000000...	112500.000000...	87.612654
187	496465	VEI01	13194.63	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	86.6378454187...	2025.000000000...	175441.636972...	85.9168134843...	900.000000000...	77325.1321358...	86.277329
188	496468	VEI09	41.14	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	NULL	0	0	65.2821345313...	621.54426574...	40402.6321464...	65.003628
189	496469	VEI07	37069.56	incrocio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	94.0128643646...	2259.76086425...	211157.925728...	92.8120764820...	1377.33325195...	126412.345654...	92.611553
190	496470	VEI07	97397.37	incrocio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	81.3703949820...	6460.61972045...	525185.605289...	73.4865553598...	1125.000000000...	82672.3747798...	77.388419
191	496474	VEI01	38125.95	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	55.9574672976...	5030.77861022...	284480.227751...	32.6328951873...	450.000000000...	14684.8028343...	44.590424
192	496920	VEI09	2847.24	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	63.3388912942...	1350.000000000...	85507.5032471...	NULL	NULL	NULL	63.338891
193	496935	VEI01	11898.81	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	85.1418434213...	2025.000000000...	172412.232928...	NULL	NULL	NULL	85.141843

Figura 105 – Tabella attributi del risultato successivo all'unione dei files

Il campo "MEDIA" è stato ottenuto tramite la seguente procedura:

- Comando "Aggregate" (Fig.106) per ordinare lo shapefile risultato dell'unione tra il vettore contenente le informazioni estratte automaticamente e la CTC area di circolazione veicolare
- Si raggruppa per codice "cit\_ar", si imposta 'sum' per il campo 'area', per il resto 'first value'



- Si aggiunge il campo “*prodotto*” dato dall’espressione ‘*pci\*area*’ che servirà per la media ponderata

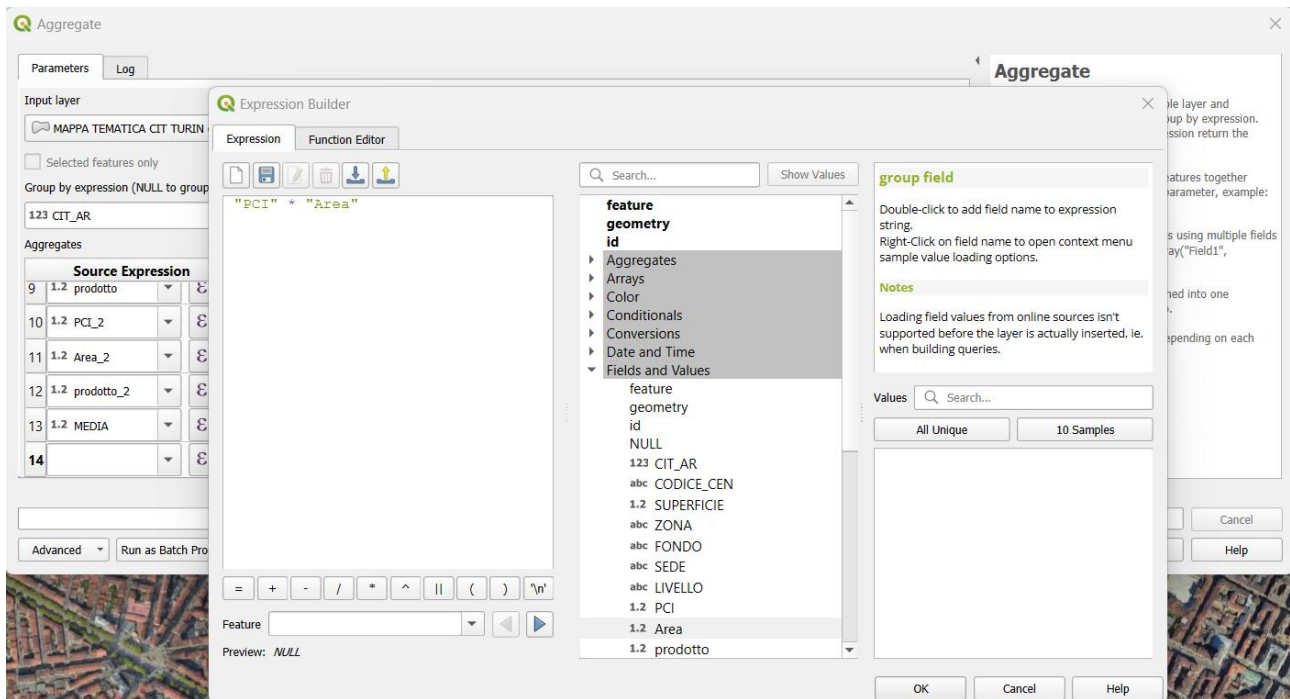


Figura 106 - Comando Aggregate, espressione da inserire per l’aggiunta del campo ‘prodotto’

- Si apre “Open Field Calculator” nella tabella attributi (Fig.107)

	CIT_AR	CODICE_CEN	SUPERFICIE	ZONA	FONDO	SEDE	LIVELLO	PCI
1	4285	VEI09	665.72	parcheggio	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	
2	5234	VEI01	152744.13	tronco ordinario	pavimentato con asfalto	a raso	non in sottopas...	79.4215950

Figura 107 - Comando Open Field Calculator nella tabella attributi

- Si aggiunge il campo “*MEDIA*” tramite le funzioni visibili in Fig.108
- Si filtrano poi le aree con “*MEDIA*” nulla (Fig.109) e le si eliminano, poiché sono quelle fuori dalla zona su cui si ha lavorato



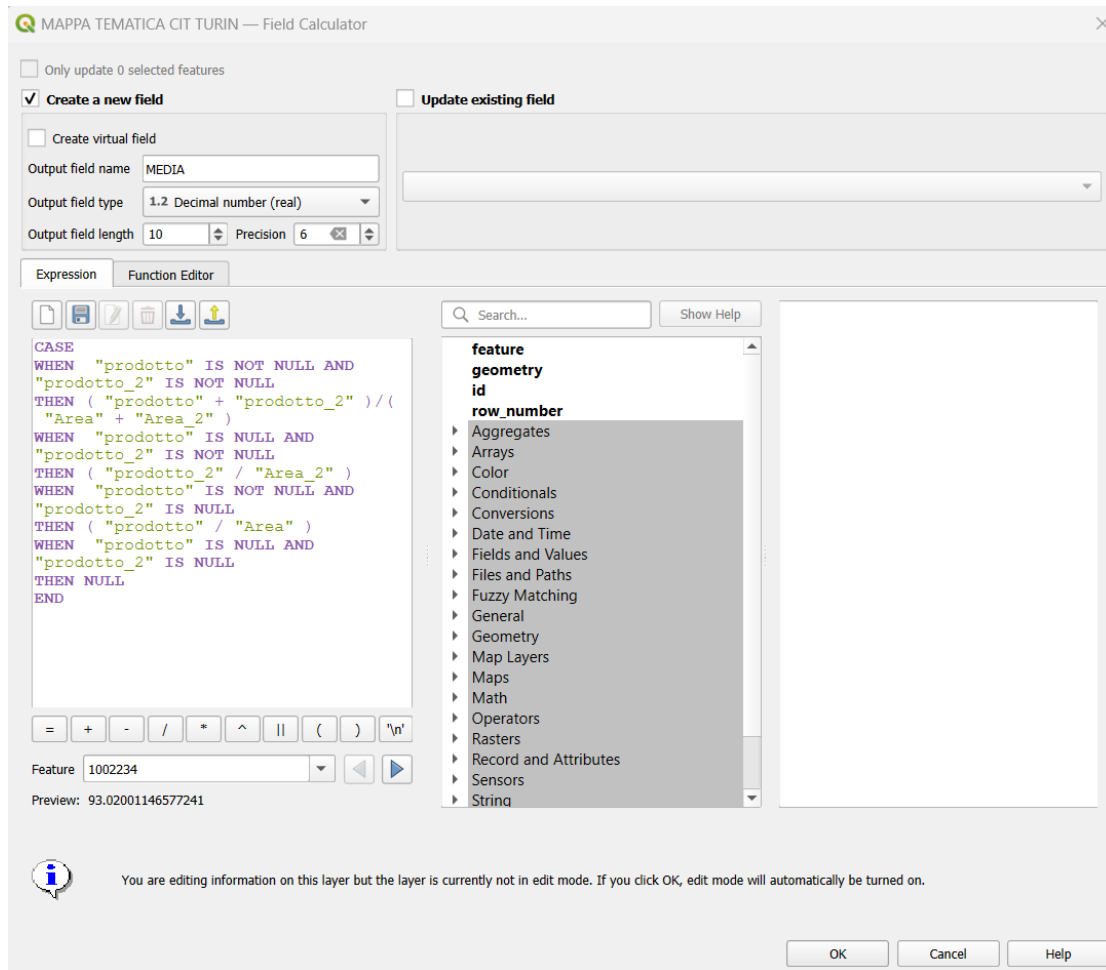


Figura 108 - Funzioni da utilizzare per l'aggiunta del campo MEDIA

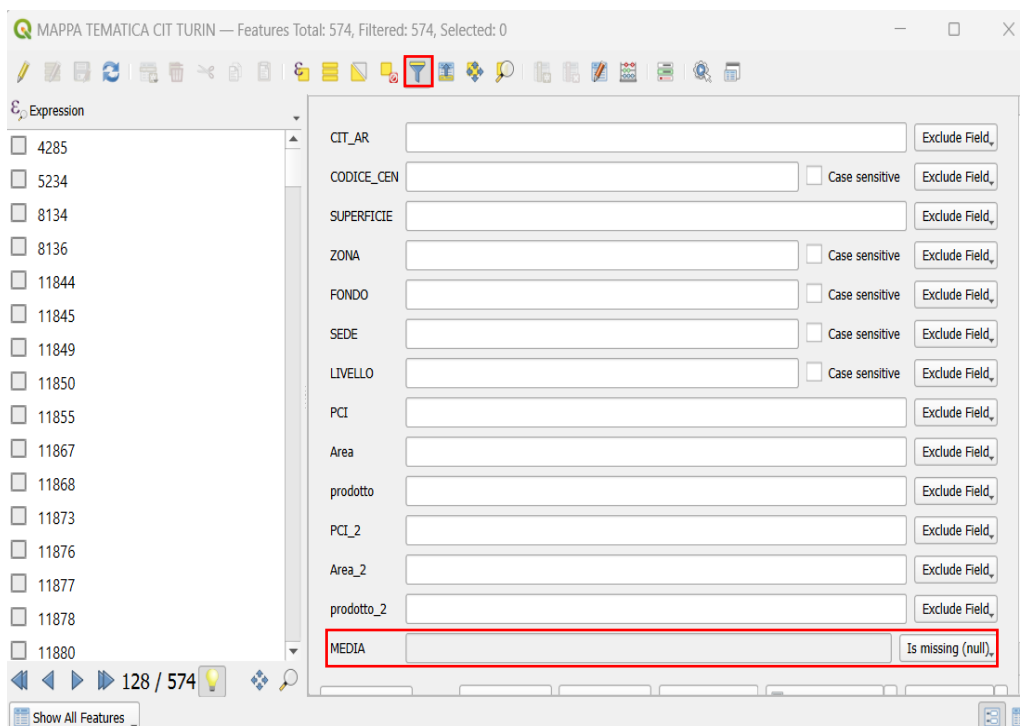


Figura 109 - Operazione di filtraggio

In Fig. 108 si nota l'utilizzo della funzione "CASE" così da poter inserire e raggruppare tutti i differenti casi riscontrabili.

Questo campo "MEDIA" è quindi risultato di una media ponderata operata sui valori di PCI distribuiti sulle superfici dei tronchi stradali in base alle aree di validità di ognuno.

Si sottolinea che i campi "Area", aggiunto dal procedimento svolto, e "Superficie", già presente nella CTC, risultino diversi per via del procedimento di analisi automatica effettuato, nel quale non è seguita dettagliatamente la geometria stradale.

Una volta calcolato e aggiunto il campo "MEDIA", si basa su di esso l'impostazione della simbologia come segue in Fig.110.

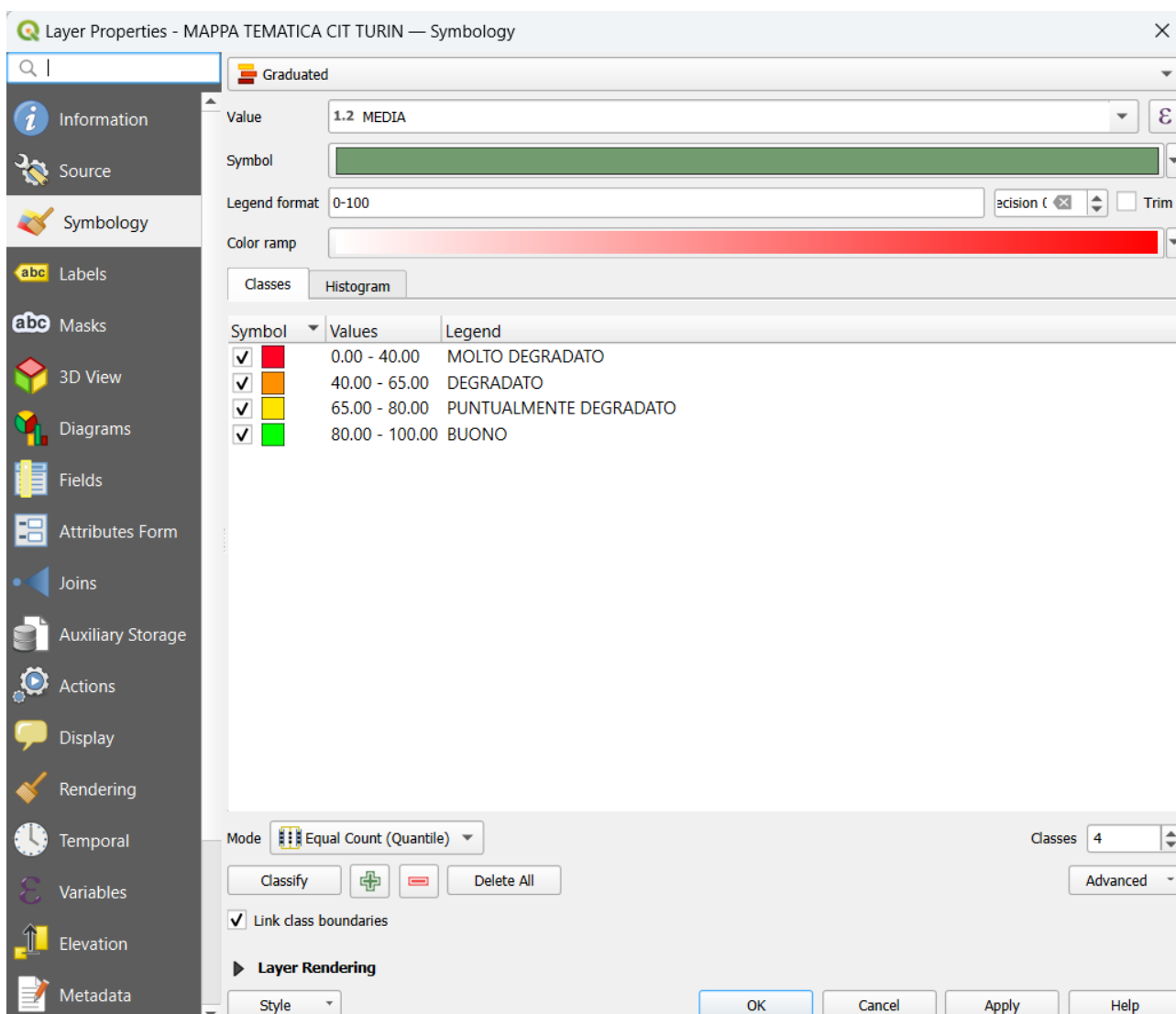


Figura 110 – Impostazione della simbologia

Si nota com'è stato necessario cambiare i valori tra cui variano le 4 classi da quelli precedentemente usati mostrati in Tabella 11 nel Capitolo 4, così da avere un risultato più in linea con i criteri del Comune.

Il risultato finale è visibile in Fig.111, il cui file è stato nominato "MAPPA TEMATICA CIT TURIN".



*Figura 111 – Mappa tematica Cit Turin; risultato finale*

Questa è quindi la condizione in cui verge la zona di Cit Turin aggiornata al 2024 e approvata dai tecnici comunali.

Ci è possibile fare un confronto con la mappa gentilmente concessa dal CSI riguardante la situazione del 2009, anno in cui, interamente con metodo visivo e manuale, avevano censito le strade inserendo anche le condizioni del manto stradale (Fig.112).



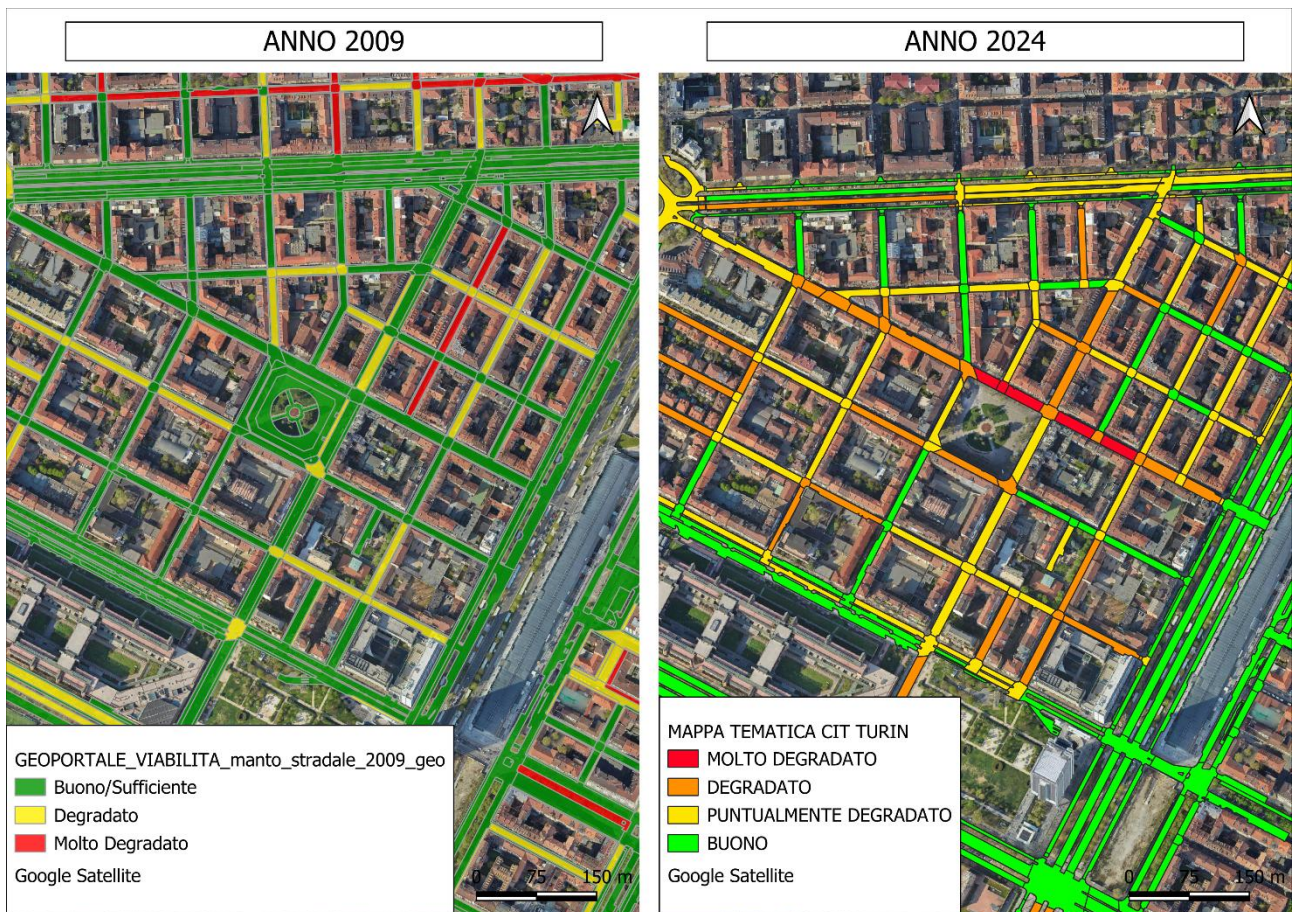


Figura 112 – Confronto condizioni 2009-2024

Si notano cambiamenti principalmente nei piccoli tronchi stradali, oltre ad alcuni anche nei corsi principali, inoltre erano state utilizzate solo 3 classi di severità per la descrizione delle condizioni della pavimentazione stradale.

In quest'ultimo elaborato, si è riusciti a calibrare i nostri valori nelle categorie richieste, così che effettivamente i risultati possano essere utilizzati dai tecnici comunali per programmare gli interventi e avere una stima dei costi calcolata ad esempio, come si vedrà in seguito, sfruttando le superfici occupate dalle varie classi, sottolineando l'importanza di avere una geometria che rispecchi le aree realmente occupate dalle strade, come precedentemente accennato.



## 5.2 STIMA DEI COSTI PER IL RIPRISTINO E PROBLEMATICHE

In questo capitolo si tratteranno i costi e le problematiche connesse alla situazione riscontrata nella mappa finale ottenuta.

Ad ognuna delle 4 classi della classificazione scelta è associata una condizione più o meno severa della carreggiata stradale e perciò interventi diversi.

Se la strada è risultata in condizioni “buono/sufficiente” non saranno da attuare lavori, per un “puntualmente degradato” sarà necessario un intervento di ordinaria, quindi interventi localizzati di colmatare buche e messa in sicurezza, mentre per le ultime due condizioni gli interventi sono più importanti. Nel caso la classe risultante fosse “degradato” si interviene in maniera superficiale tipicamente tramite fresatura e rifacimento del tappeto d’usura, mentre nel caso di livello “molto degradato” l’intervento sarà più profondo e sarà necessario una fresatura e un rifacimento del tappeto d’usura con risanamenti profondi (15-25 cm) per circa il 40% della superficie totale.

I costi legati ai diversi interventi non saranno gli stessi, si considerano circa 5 €/mq per il puntualmente degradato, 25 €/mq per il degradato e 70 €/mq per il molto degradato, sottolineando che si sono considerati interventi esclusivamente su carreggiate stradali in conglomerato bituminoso. Questi costi al metro quadro son stati indicati dall’ingegnere Michele Gizzo, uno dei tecnici comunali facenti parte della sezione inerente la gestione del suolo.

Si è calcolata la presenza percentuale delle varie classi risultanti nel file finale “mappa tematica Cit Turin” per avere un’idea più precisa delle condizioni in cui verge l’area di Cit Turin ed è visibile in Tabella 12.

Le percentuali sono state calcolate come:

$$percentuale = \frac{N \text{ elementi classe}}{Tot \text{ elementi}} * 100$$

Successivamente si sono calcolate le superfici totali ricoperte da ogni classe per poter avere una spesa totale degli interventi da attuare.

Il costo totale è stato poi calcolato come:

$$costo \text{ totale} = MQ * \text{€/MQ}$$

Per il costo affibbiato alla classe “Molto Degradato” è stato usato il 40% della sua superficie totale per rimanere in linea con l’intervento attuabile descritto in precedenza.

$$costo \text{ totale molto degr.} = (MQ * 0,4) * 70\text{€/MQ}$$

Infine, il costo complessivo deriva dalla sommatoria delle spese per ogni classe.

Tabella 12 – Presenza percentuale delle varie classi e calcolo costi totali di risanamento in base a superficie ricoperta e costi al metro quadro

CLASSE	PRESENZA %	MQ	€/MQ	COSTO TOTALE
<b>Buono/Sufficiente</b>	64,71 %	2644397 m <sup>2</sup>	0 €/mq	0 €
<b>Puntualmente Degradato</b>	25,74 %	1453400 m <sup>2</sup>	5 €/mq	7.267.000 €
<b>Degradato</b>	13,97 %	238325 m <sup>2</sup>	25 €/mq	5.958.125 €
<b>Molto Degradato</b>	1,10 %	10301 m <sup>2</sup>	70 €/mq	288.428 €
<b>TOTALE COMPLESSIVO</b>				<b>13.513.553 €</b>

Si nota che oltre il 60% della pavimentazione stradale risulta in buono stato e non necessita di interventi di manutenzione. L'area di Cit Turin risulta perciò in condizioni discretamente buone, contando anche che la condizione prevalente per cui si dovrebbe intervenire risulta essere la classe "puntualmente degradato".

Bisogna sottolineare che questa procedura, in quanto sperimentale, necessita ancora di migliorie per poter snellire ulteriormente l'intervento manuale. Le principali criticità riscontrate sono innanzitutto il riconoscimento dei chiusini come buche, i quali però, alle volte, sono effettivamente ad una quota di qualche centimetro inferiore rispetto al manto stradale da risultare effettivamente tali (Fig.113), e la necessità di dividere quantomeno i corsi e le strade principali in semicarreggiate, in quanto si riscontrano spesso semicarreggiate in condizioni differenti (Fig.114). Un'altra criticità riguarda la valutazione dei corsi in cui sono presenti le corsie preferenziali per taxi e mezzi di trasporto pubblico, spesso in condizioni molto differenti, come visibile in Fig.115 in cui si inquadra un tratto di Corso Vittorio Emanuele II dov'è possibile notare le buone condizioni in cui verge la parte centrale del corso, al contrario di quelle presenti nella corsia preferenziale sulla destra.

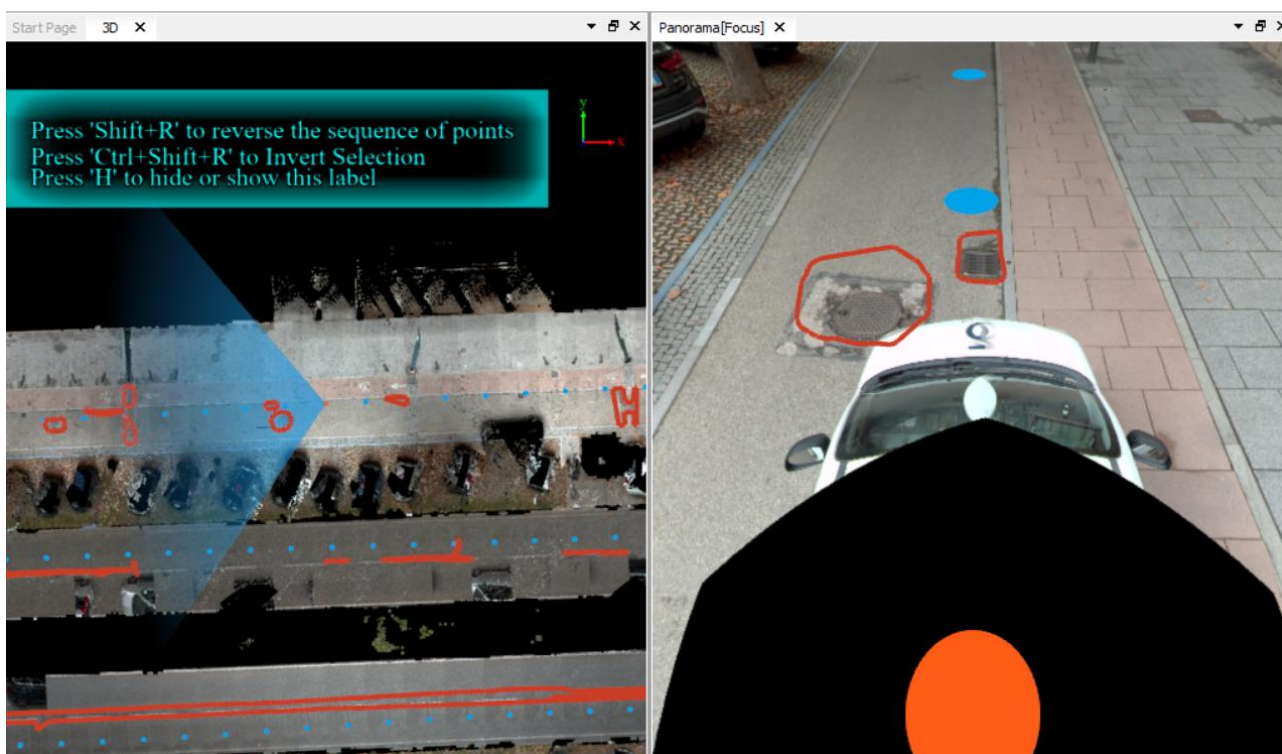


Figura 113 – Tombini riconoscibili come buche



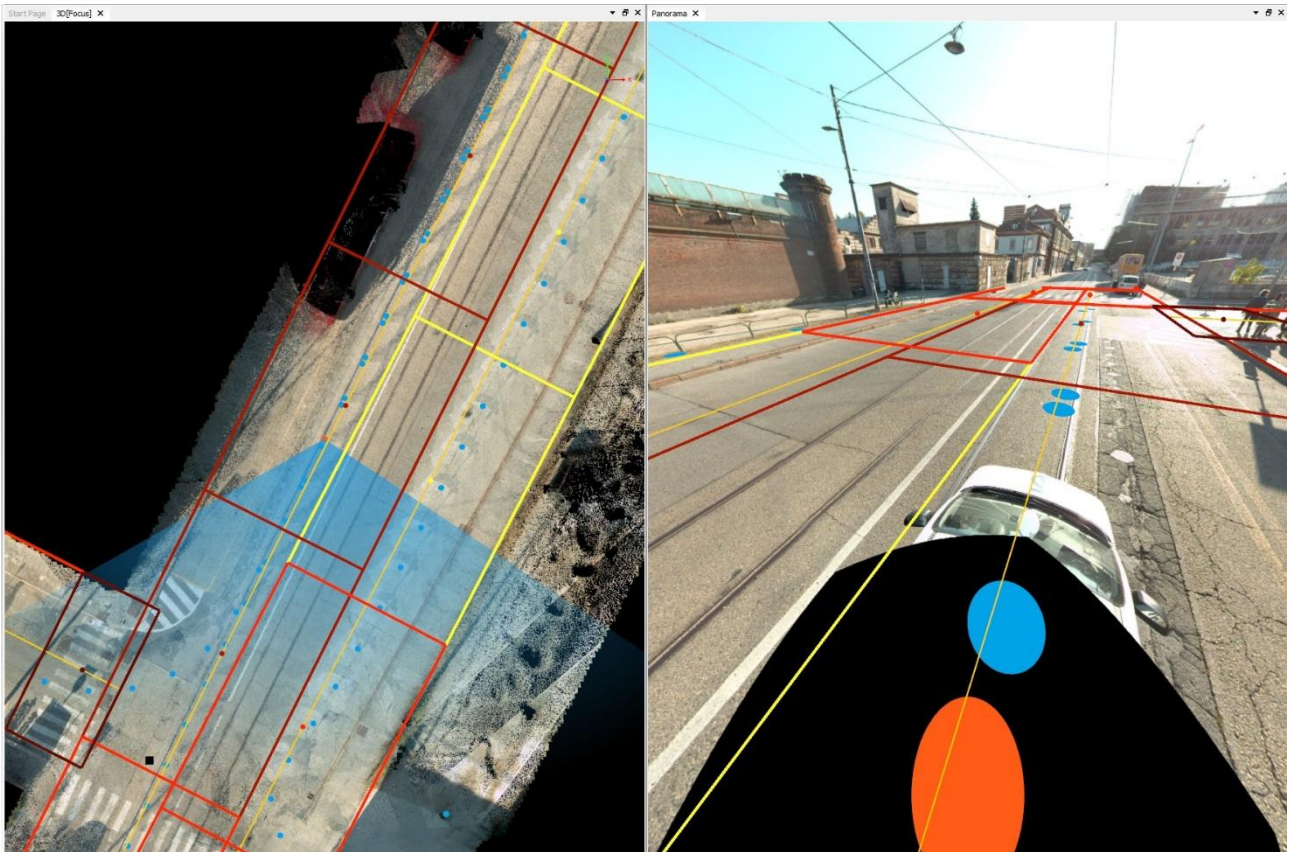


Figura 114 – Semicarreggiate in condizioni differenti: a destra le condizioni sono decisamente peggiori rispetto all'altro lato, nella visuale di sinistra si notano anche i colori diversi assegnati dal software dopo il calcolo del PCI

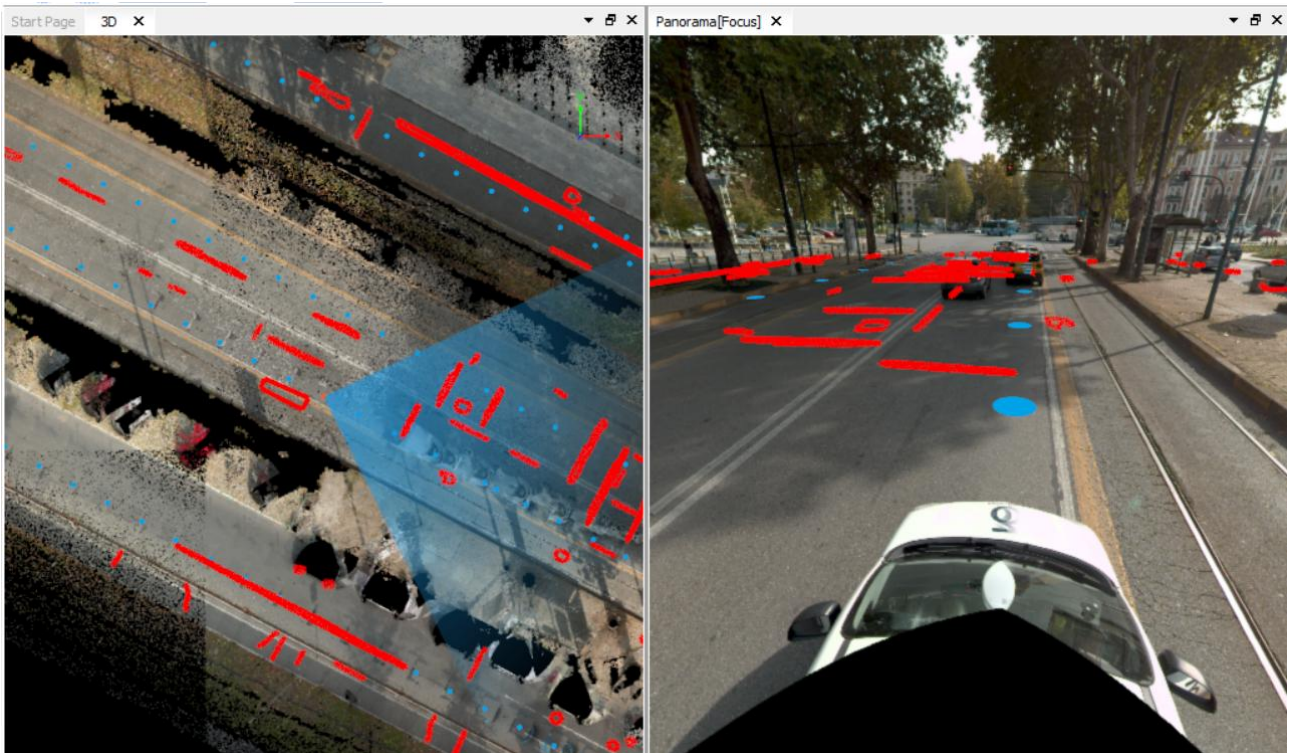
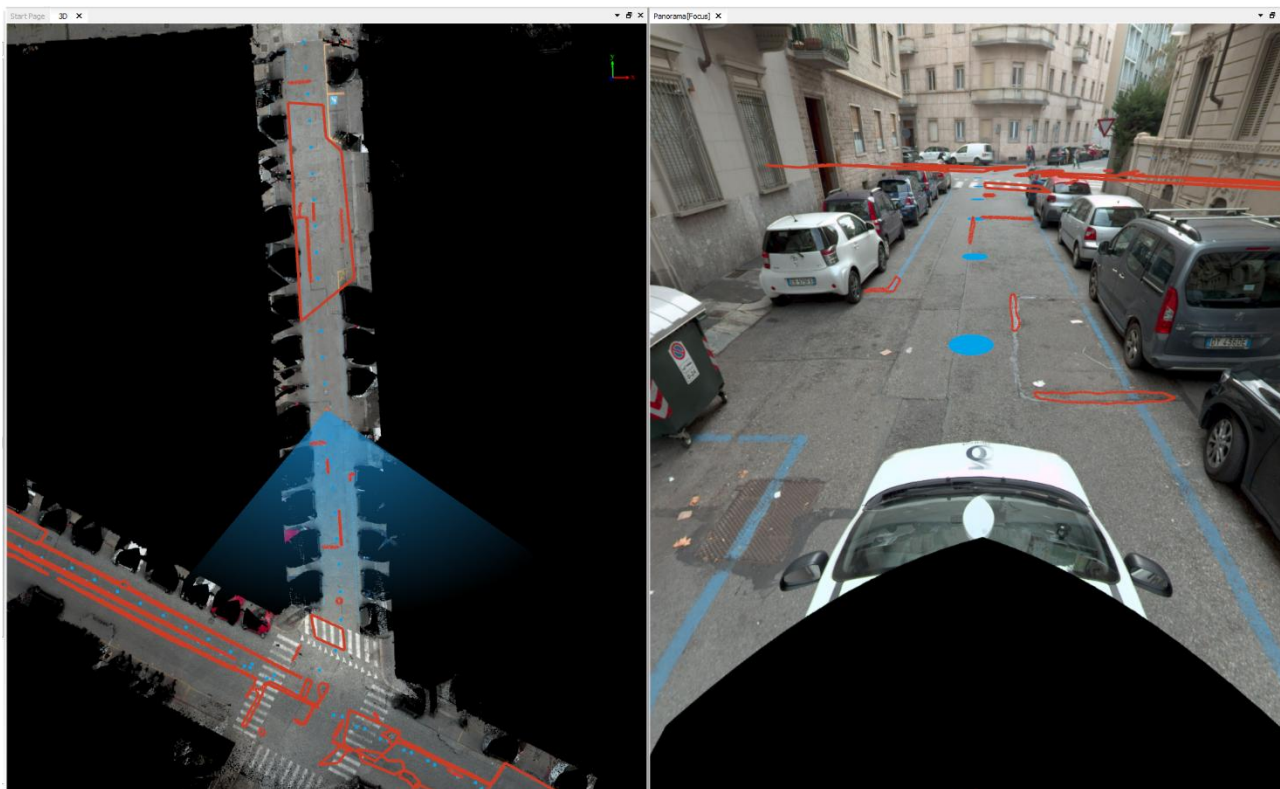


Figura 115 – Corso Vittorio Emanuele II, a destra si nota la corsia riservata in condizioni peggiori rispetto alle carreggiate centrali del corso

Un ulteriore appunto sarebbe da fare sulle strade che presentano numerosi interventi localizzati di colmatare buche e messa in sicurezza, le quali, pur essendo in condizioni accettabili al momento, andranno incontro a un degrado più rapido e severo di altre zone. Un esempio è riportato in Fig.116.



*Figura 116 – Esempio di una delle strade che presentano numerosi rattoppi*



## 6. CONCLUSIONE E SPUNTI MIGLIORAMENTI FUTURI

L'analisi condotta in questa ricerca ha dimostrato come l'impiego di dati ad alta risoluzione geometrica possa rappresentare un avanzamento significativo nella gestione e manutenzione delle infrastrutture stradali. Il metodo adottato può effettivamente consentire di superare le limitazioni dei sistemi tradizionali basati su segnalazioni telefoniche e ispezioni visive tutt'ora utilizzati dagli enti gestori "minori", quali i comuni.

Uno degli aspetti di maggiore rilievo di questo studio è stata la collaborazione con i tecnici del Comune di Torino, che ha permesso di ottenere dati aggiornati dell'area di Cit Turin valutandone concretamente l'utilità dell'approccio utilizzato, con risultati che fossero in linea con la loro scala di valutazione delle condizioni della pavimentazione stradale.

L'analisi effettuata ha permesso di individuare le criticità presenti sulla rete viaria e fornire indicazioni sulle condizioni dei tronchi stradali mirate alla pianificazione degli interventi di manutenzione. L'aspetto pratico del lavoro è stato quindi di fondamentale importanza, poiché ha reso disponibili informazioni aggiornate che il Comune potrà utilizzare per migliorare la gestione della propria rete stradale.

Tuttavia, nonostante i progressi ottenuti, alcune problematiche rimangono aperte, in particolare per quanto riguarda l'organizzazione dei tempi di manutenzione e la gestione delle risorse economiche. Attualmente, la programmazione degli interventi risente di vincoli economici e di un aggiornamento frammentato delle condizioni stradali, con il rischio che le operazioni di ripristino vengano effettuate in maniera non ottimale. Per risolvere questa criticità, sarebbe opportuno adottare un sistema di monitoraggio continuo che permetta di aggiornare costantemente lo stato della rete stradale, in modo da pianificare gli interventi con maggiore tempestività e precisione.

Un importante passo avanti in questa direzione è rappresentato dal recente accordo tra il Comune di Torino e l'azienda Digitarca, offerto da Intesa Sanpaolo a titolo gratuito al comune, che prevede la realizzazione di rilievi su tutta la città. Questa iniziativa consentirà di superare la mancanza di dati aggiornati, permettendo di avere una visione completa e dettagliata delle condizioni della rete stradale urbana, quantomeno aggiornata all'anno in corso.

Tra le problematiche ancora presenti nel processo di analisi, si segnalano invece le difficoltà legate alla presenza dei tombini, delle corsie preferenziali e delle semicarreggiate in condizioni di ammaloramento differenti.

I tombini rappresentano un punto critico per la regolarità della pavimentazione, spesso risultando più bassi rispetto al livello stradale, e di conseguenza riconosciuti come buche dall'analisi di riconoscimento dei dissesti, causando disagi ai veicoli e potenziali rischi per la sicurezza. Una soluzione attuabile potrebbe essere l'integrazione della loro mappatura in possesso di SMAT (Società Metropolitana Acque Torino) e, possibilmente, delle aziende di sottoservizi, di modo da poterli riconoscere immediatamente come tali.

Le corsie preferenziali, invece, subiscono spesso un degrado accelerato rispetto al resto della carreggiata a causa del passaggio costante di mezzi pesanti, come autobus e tram. Per affrontare questa criticità, si potrebbero integrare le informazioni e la loro mappatura in possesso della GTT (Gruppo Torinese Trasporti), azienda in possesso delle stesse, e che si occupa della loro gestione.

Infine, tipicamente le strade a doppia corsia presentano semicarreggiate con problematiche disomogenee, e, pertanto, dovrebbero essere gestite diversamente a livello manutentivo. In questo

caso si potrebbe richiedere al CSI, che si occupa di aggiornare la carta di circolazione veicolare della città, di dividere ulteriormente i tronchi stradali anche in semicarreggiate, quantomeno per quanto riguarda le strade più larghe e/o che presentano almeno la doppia corsia.

Un ulteriore sviluppo futuro potrebbe riguardare l'integrazione di modelli predittivi per stimare l'evoluzione del degrado stradale nel tempo, e utilizzare algoritmi di intelligenza artificiale per il riconoscimento automatico dei dissesti per migliorare la rapidità delle analisi, consentendo una gestione più proattiva della manutenzione. Questo potrebbe essere attuabile nel momento in cui ci saranno abbastanza dati storici da poter individuare un modello matematico, e quando si potrà essere facilmente in possesso delle strumentazioni adatte ad attuare tutti i monitoraggi in maniera continuativa e costante.

Per garantire il massimo impatto di queste innovazioni, sarebbe quindi fondamentale sensibilizzare le amministrazioni locali sull'importanza della digitalizzazione nella gestione delle infrastrutture stradali e investire in tecnologie avanzate e nella formazione del personale tecnico, così da migliorare la qualità e l'efficienza della manutenzione, con benefici diretti per la sicurezza e la viabilità urbana. L'integrazione di questi strumenti all'interno della pianificazione comunale potrebbe portare a un sistema di gestione più moderno, efficace e sostenibile nel lungo termine.

# BIBLIOGRAFIA

[https://docs.qgis.org/3.34/it/docs/gentle\\_gis\\_introduction/introducing\\_gis.html](https://docs.qgis.org/3.34/it/docs/gentle_gis_introduction/introducing_gis.html)

<https://www.agisoftmetashape.com/it/?srsId=AfmBOoqmhpW8-S1pyu6gQkZUK7eW7qag3tM5UoGVtztvK4TsEKAVHapA9>

[http://www.alphaconsult.it/fototeca\\_siises/documenti/CLASSIFICA%20DEGLI%20AMMALORAMENTI.html](http://www.alphaconsult.it/fototeca_siises/documenti/CLASSIFICA%20DEGLI%20AMMALORAMENTI.html)

[https://www.treccani.it/enciclopedia/infrastruttura\\_\(Enciclopedia-Italiana\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/infrastruttura_(Enciclopedia-Italiana)/)

[https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni\\_tecnici\\_volume\\_5.PDF](https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni_tecnici_volume_5.PDF)

[https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni\\_tecnici\\_Volume\\_7.pdf](https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni_tecnici_Volume_7.pdf)

<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:1992-04-30;285!vig=>

<https://www.mit.gov.it/documentazione/codice-della-strada>

[https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002847/allegati\\_doc/Lezione\\_4bis\\_-\\_Regolarita\\_e\\_IRI.pdf](https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002847/allegati_doc/Lezione_4bis_-_Regolarita_e_IRI.pdf)

<https://www.stradeeautostrade.it/pavimentazioni-e-manti/strumenti-ad-alto-rendimento-per-conoscere-le-pavimentazioni/>

<https://core.ac.uk/download/pdf/11805721.pdf>

[https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna\\_del\\_bitume/articoli/1791\\_1.pdf](https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/1791_1.pdf)

[https://iris.polito.it/retrieve/handle/11583/2612754/43864/sansci\\_Post-print\\_DRAFT.pdf](https://iris.polito.it/retrieve/handle/11583/2612754/43864/sansci_Post-print_DRAFT.pdf)

<https://pages.mtu.edu/~balkire/CE5403/ASTMD6433.pdf>

<https://www.stradeanas.it/it/la-cura-delle-strade>

[https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart\\_Book.pdf](https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book.pdf)

Felice A. Santagata, “Strade, teoria e tecnica delle costruzioni stradali vol1 e vol2”, Pearson, 2016

[https://www.bosettiegatti.eu/info/circolari/lombardia/2006\\_01790\\_DGR\\_strade.pdf](https://www.bosettiegatti.eu/info/circolari/lombardia/2006_01790_DGR_strade.pdf)

<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B1-2021/103/2021/isprs-archives-XLIII-B1-2021-103-2021.pdf>

<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4262#B98-sensors-22-04262>

<https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2013/00000079/00000004/art00005#>

<https://www.rose-hulman.edu/class/cs/OldFiles/csse461/handouts/Day21/Brown71.pdf>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521003101>

<https://www.greenvalleyintl.com/LiDAR360MLS/>

<https://www.greenvalleyintl.com/gvi/web/us/file/EN-LiDAR360-MLS-V8.1.pdf>

<https://trasparenza.csi.it/amministrazione-trasparente#:~:text=CSI%2DPiemonte%20%C3%A8%20un%20consorzio,tempo%20e%20ridurre%20le%20spese>