



Regione Toscana

REGIONE TOSCANA

PR FESR 2021-2027 OP1 OS1 Azione 1.1.4 “Ricerca e sviluppo per le imprese anche in raggruppamento con organismi di ricerca”

Obiettivo Operativo I: Studio dello Stato dell’Arte

Parte I: Ammaloramenti Stradali



Regione Toscana

Sommario

I. Introduzione.....	3
II. Individuazione e classificazione delle numerose tipologie di ammaloramenti che si possono verificare durante la vita utile dell'infrastruttura	3
III. Indicatori di stato delle pavimentazioni più diffusi in letteratura	15
III.I INDICATORI SPECIFICI.....	15
Tessitura di una pavimentazione stradale	15
Regolarità longitudinale	17
Regolarità trasversale	18
Aderenza	19
III.II INDICATORI SINTETICI	20
PCI (Pavement Condition Index)	20
PCR (Pavement Condition Rating).....	23
PSI (Present Serviceability Index)	24
I ₁ (Indice Sintetico Globale)	25
IV. Contributo della condizione delle pavimentazioni sulla generazione degli incidenti stradali	27
V. Conclusioni.....	31
Bibliografia	32

I. Introduzione

Il presente documento concerne lo studio dello stato dell'arte in materia di ammaloramenti stradali. La prima parte riguarderà la classificazione delle numerose tipologie di ammaloramenti che si possono riscontrare durante la vita utile di una infrastruttura. Successivamente, l'attenzione sarà focalizzata sugli indicatori di stato delle pavimentazioni maggiormente utilizzati e più diffusi in letteratura. Infine, la parte finale del documento sarà dedicata all'importante tematica relativa al contributo della condizione delle pavimentazioni sulla generazione degli incidenti stradali.

II. Individuazione e classificazione delle numerose tipologie di ammaloramenti che si possono verificare durante la vita utile dell'infrastruttura

La formazione delle diverse tipologie di ammaloramenti stradali è dovuta agli effetti combinati di diversi fattori, tra cui l'azione dei carichi del traffico veicolare, le condizioni climatiche e ambientali, le caratteristiche dei materiali impiegati e le modalità costruttive [1, 2].

I dissesti stradali possono essere distinti in [3]:

- “superficiali” quando interessano principalmente lo stato del manto di usura e influenzano fortemente l'interazione pneumatico-pavimentazione;
- “strutturali” quando invece interessano l'intero pacchetto della sovrastruttura e comportano un degrado complessivo della pavimentazione, non più in grado di assorbire adeguatamente i carichi del traffico veicolare. In aggiunta, il degrado strutturale incide negativamente anche sulle proprietà superficiali della pavimentazione, in particolare sulla regolarità del piano di via.

Esistono numerosi cataloghi e classificazioni dei dissesti specificati all'interno di normative o previsti da Enti Pubblici o gestori delle infrastrutture, tra cui [2, 3, 4, 5, 6].

La Figura 1 riporta le 4 categorie principali considerate per le pavimentazioni flessibili nel Catalogo per l'identificazione visiva dei dissesti superficiali previsto dalla Regione Toscana [2]:

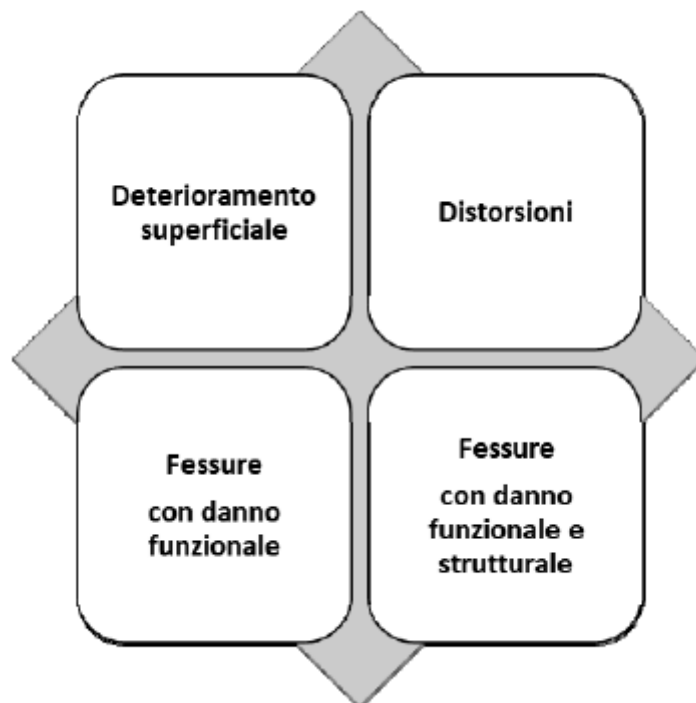


Figura 1: Categorie principali previste dalla Regione Toscana [2]

La prima categoria relativa al “Deterioramento superficiale” comprende tutta una serie di dissesti (come presenza di buche, sgranamento, risalita di legante bituminoso, levigazione degli aggregati lapidei) che vanno ad incidere negativamente sulle caratteristiche di aderenza e regolarità della pavimentazione, causando una potenziale riduzione della sicurezza e del comfort di marcia. Tale tipologia di dissesti non comporta necessariamente danni strutturali alla pavimentazione.

La seconda categoria fa riferimento alle “distorsioni”, ossia a deformazioni permanenti di uno o più strati della pavimentazione. La presenza di tali dissesti può essere causata dall’azione dei carichi del traffico veicolare oppure da cedimenti degli strati profondi della sovrastruttura.

La terza categoria raggruppa le “fessurazioni con danno funzionale”. Si tratta di lesioni che vanno ad interessare in genere lo strato superficiale della pavimentazione e che presentano schemi fessurativi differenti a seconda delle diverse tipologie di fessurazioni che si possono verificare. Fanno parte di questa categoria, ad esempio, le fessure trasversali, longitudinali, a blocchi e di giunto. Le cause di tali dissesti possono essere svariate: l’azione dei carichi di traffico, errate modalità realizzative dei giunti, le discontinuità dovute alla presenza di tombini o chiusini, contrazioni eccessive dello strato di usura alle basse temperature. La presenza di tali dissesti va a compromettere le proprietà funzionali del piano di via e, a lungo termine senza

una adeguata manutenzione, potrebbe comportare anche danni strutturali dovuti all'infiltrazione di acqua verso gli strati profondi.

La quarta categoria comprende le “fessurazioni con danno funzionale e strutturale”. Tale tipologia di ammaloramenti, causata dall'azione ripetuta dei carichi di traffico, si sviluppa solitamente nello strato di base del conglomerato bituminoso per poi propagarsi dal basso verso l'alto in superficie. Questo fenomeno è conosciuto come rottura a fatica di tipo “bottom-up” ed è quello considerato dal Catalogo della Regione Toscana per la quarta categoria di dissesti. Tale tipologia di dissesti richiede la necessità di interventi profondi, poiché il ripristino del solo strato di usura non consente la risoluzione delle problematiche presenti.

La successiva Figura 2 descrive il meccanismo di rottura di tipo “bottom-up”. La pavimentazione, per il passaggio dei veicoli, risulta soggetta a tensioni cicliche di trazione e compressione. Nello specifico, la sovrastruttura stradale, schematizzata come una trave appoggiata su due punti e caricata in mezzzeria, al passaggio della ruota tende ad inflettersi con generazione di tensioni massime di trazione alla base degli strati legati [3]. L'azione ripetuta del traffico nel tempo tenderà a deteriorare il conglomerato, caratterizzato da scarsa resistenza a trazione, con generazione di fessure che si svilupperanno dallo strato di base verso l'alto.

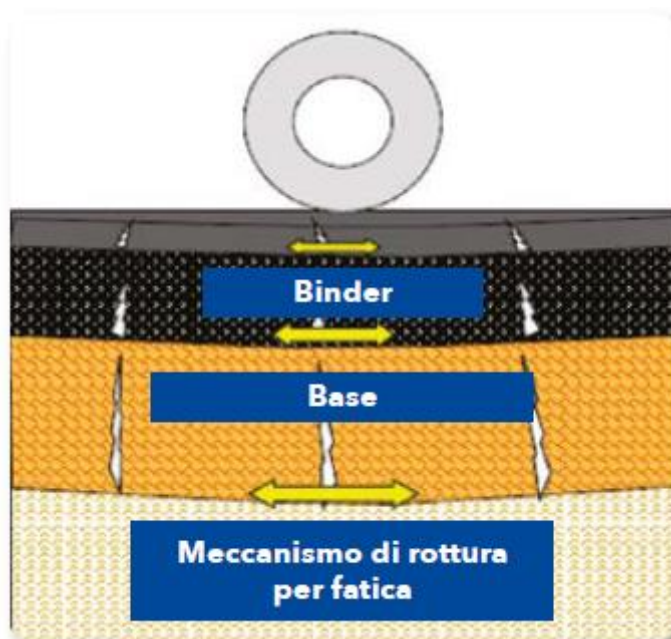


Figura 2: Fessurazione di tipo “bottom-up” [3]

Va comunque specificato che esiste un ulteriore meccanismo di rottura, denominato di tipo “top-down”, in cui le fessurazioni si innescano sulla superficie della pavimentazione per poi

propagarsi in seguito in profondità. Tale tipologia di fessure si genera al bordo della zona di impronta degli pneumatici a causa di sforzi di trazione indotti dal passaggio dei veicoli [3].

Alla luce dei documenti visionati vengono riportate di seguito le principali tipologie di ammaloramento della pavimentazione stradale. In particolare, si farà riferimento a quanto riportato nei cataloghi dei dissesti della Regione Toscana [2] e Regione Lombardia [4], che fanno riferimento a tre livelli di severità (basso, medio, alto) per i dissesti considerati.

Deterioramento superficiale	
	Rifluimento del legante Consiste nella presenza di legante bituminoso che appare sulla superficie stradale. Tale fenomeno si manifesta principalmente in prossimità delle zone interessate dal transito delle ruote del veicolo [4]. Può essere causato da diversi fattori come errori nella produzione e posa in opera della miscela bituminosa, oppure presenza di alte temperature ed elevati livelli di traffico, o ancora risalita in superficie della mano d'attacco tra lo strato di usura e quello di binder [2]. In termini di effetti negativi sulla sicurezza di marcia, il rifluimento di legante in superficie può comportare una potenziale riduzione dell'aderenza. Il livello di severità dipende dall'entità della risalita di legante (dalla comparsa di qualche traccia nera nei casi di livello di severità basso, fino all'apparire della superficie stradale come "umida" in quelli con livello di severità alto) [4]. Il livello di estensione dipende dalla percentuale di tratto caratterizzato dalla presenza di risalita di legante [2].

Rifluimento del legante [4]



Sgranamento [2]

Sgranamento

Perdita di inerti dalla superficie della pavimentazione che può avere carattere diffuso o localizzato.

L'evoluzione di tale fenomeno, che può interessare l'intera superficie della pavimentazione, può comportare anche la formazione di fessure e, successivamente, quella di buche [4].

Tale ammaloramento può essere causato dall'eccessivo invecchiamento nel lungo periodo del legante bituminoso, oppure da problematiche connesse all'adesione tra aggregati lapidei e legante, o ancora relative alla produzione e posa in opera [2].

Il livello di severità dipende dall'entità della perdita di materiale (nel caso di severità alta gli aggregati si distaccano in blocchi), mentre il livello di estensione è connesso alla percentuale di superficie caratterizzata dalla presenza di tale fenomeno [2].



Usura superficiale [4]

Usura superficiale

Si tratta di un graduale e continuo deterioramento dello strato superficiale dovuto all'azione del traffico veicolare soprattutto in corrispondenza delle zone di passaggio delle ruote.

Rispetto all'ammaloramento relativo al distacco dello strato superficiale, nel caso di usura superficiale le superfici interessate dal fenomeno presentano contorni non netti.

Il livello di severità dipende dalla profondità dei solchi da usura generati, che può essere superiore ai 30 mm (nel caso di severità alta) [4].



Distacco dello stato di usura [4]

Distacco dello stato di usura

Questa tipologia di ammaloramento riguarda il distacco di porzioni dello strato di usura dallo strato sottostante, che risulta ben visibile.

Tale fenomeno evolve rapidamente e può comportare il rifacimento dello strato superficiale [4].

Il livello di severità dipende dalla profondità (considerando una soglia pari a 25 mm) e dalle dimensioni dell'area interessata dal distacco (considerando una soglia di 1 m²), mentre il livello di estensione è correlato al numero di aree che presentano distacco su 100 m di tratto [2].



Buche [4]

Buche

Tale ammaloramento concerne la formazione di buche, di forma circolare, che possono estendersi fino agli strati profondi della pavimentazione.

Vengono generate soprattutto a partire da preesistenti fessurazioni (in particolare quelle a pelle di coccodrillo) o da processi di sfondamento della pavimentazione [4].

Si tratta di ammaloramenti che, sotto le azioni del traffico, tendono ad estendersi velocemente sulla pavimentazione [4], che meritano di essere particolarmente attenzionati, poiché possono comportare rischi elevati alla circolazione stradale [2].

Il livello di severità dipende dalla profondità e dal diametro della buca [2, 4].



Usura liscia [2]

Usura liscia

Questo tipo di ammaloramento può essere dovuto alla presenza di aggregati lapidei “lisci” a causa delle azioni tangenziali del traffico veicolare oppure può verificarsi quando la superficie dello strato di usura risulta particolarmente liscia dopo la stesa per tessitura insufficiente dovuta ad un erroneo assortimento granulometrico della miscela bituminosa [2].

Tale ammaloramento comporta una riduzione di aderenza.

Nel caso della levigazione degli aggregati, il livello di severità è connesso allo stato degli aggregati in superficie (livello basso se risultano parzialmente scoperti con legante ancora presente oppure livello alto se l'aggregato grosso appare totalmente scoperto e liscio), mentre il livello di estensione dipende dalla percentuale di tratto caratterizzato dalla presenza di tale fenomeno.



Rappezzi [2]

Rappezzi

Si tratta di deterioramenti superficiali che possono avere luogo in prossimità dei giunti oppure sulla superficie dei rappezzi [2].

Il livello di severità di tali ammaloramenti è basso nel caso di rappezzi con lievi difetti d'unione, mentre risulta alto in presenza di rappezzi con importanti difetti d'unione, non legati al rivestimento, con fessurazioni e cedimenti [2,4].



Dissesti e avvallamenti in prossimità dei chiusini [4]

Dissesti e avvallamenti in prossimità dei chiusini

Tali ammaloramenti fanno riferimento alla possibilità di generazione di fessurazioni, avvallamenti e distacco di materiale in prossimità dei chiusini [4].

Il livello di severità è connesso alla variazione delle condizioni di marcia avvertita dall'utente stradale a causa di tali dissesti ed alla possibilità di ristagni d'acqua dovuti alle alterazioni del piano viabile.

Livelli di severità alti sono associati a dissesti fortemente pericolosi per la sicurezza marcia ed in presenza di elevato ristagno d'acqua [4].

Distorsioni



Ormaie [4]

Ormaie

Si tratta di deformazioni della sovrastruttura stradale connessa al passaggio del traffico veicolare, localizzata in prossimità delle zone interessate dal passaggio delle ruote. Possono estendersi anche agli strati profondi.

Il livello di severità dipende dalla profondità P dell'ormaia (rispetto alla barra) e dall'eventuale presenza di fessurazioni [2,4]:

- basso ($P < 15\text{mm}$);
- medio ($P < 30\text{mm}$) con eventuale leggera fessurazione;
- alto ($P \geq 30$) ed eventuali fessurazione longitudinale o pelle di coccodrillo.

Il livello di estensione dipende dalla percentuale di tratto caratterizzato dalla presenza di ormaie.



Avvallamenti [2]

Avvallamenti

Visibili depressioni del manto stradale lungo la direzione longitudinale che possono influenzare il comfort di marcia e pregiudicare lo smaltimento delle acque.

Il livello di severità dipende dall'effetto degli avvallamenti presenti sul comfort di guida e sul corretto smaltimento delle acque superficiali [2,4].

Il livello di estensione è funzione del numero di avvallamenti su 100 m di tratto [2].



Cedimenti [2]

Cedimenti

Si tratta di cedimenti con forma circolare o ellittica che possono essere a carattere localizzato oppure diffuso. Tali ammaloramenti possono essere causati da cedimenti degli strati profondi oppure da cicli di gelo-disgelo.

Il livello di severità dipende dal carattere del cedimento (localizzato o diffuso) e dall'eventuale entità di fessurazione presente sulla pavimentazione, mentre il

	livello di estensione è connesso al numero cedimenti presenti su 100 m di tratto [2].
 <i>Corrugamenti [2]</i>	Corrugamenti Tale tipologia di ammaloramento consiste in ondulazioni dello strato superficiale che si possono presentare in zone caratterizzate da elevata trasmissione di azioni tangenziali dovute al traffico veicolare, come zone di frenata o lungo una rotatoria. Il livello di estensione è funzione del numero corrugamenti presenti su 100 m di tratto [2].
 <i>Rigonfiamenti da radici [2]</i>	Rigonfiamenti da radici Si tratta di rigonfiamenti di tipo localizzato del piano di via dovuti alla presenza delle radici di alberi in prossimità della pavimentazione. Il livello di severità dipende dall'entità dei rigonfiamenti che possono essere anche multipli ed eventualmente comportare fessurazioni, mentre il livello di estensione è funzione del numero di alberi a bordo strada che comportano tale ammaloramento su 100 m di tratto [2].

Fessurazioni



Fessure trasversali [4]

Fessure trasversali

Tale tipologia di fessure si genera in maniera perpendicolare all'asse stradale, con formazione di una fessurazione principale che si manifesta tipicamente ad intervalli regolari e che può essere accompagnata da fessurazioni secondarie di tipo localizzato ed irregolare.

Il livello di severità dipende dalla larghezza della fessura principale (considerando valori di soglia pari a 2 e 10 mm), dall'eventuale presenza ed entità di fessurazione secondaria e dalla possibile perdita di materiale ai bordi della fessura principale nei casi più accentuati di degrado [4].



Fessure longitudinali [4]

Fessure longitudinali

Si tratta di fessure che si propagano in maniera parallela all'asse stradale seguendo in genere un andamento zigzagato [4].

Contestualmente ad una fessurazione principale possono eventualmente generarsi fessurazioni parallele.

Il livello di severità di tale ammaloramento è associato alla larghezza della fessura principale (considerando valori di soglia pari a 2 e 10 mm), alla eventuale presenza ed entità delle fessure parallele ed al possibile degrado dei bordi della fessura principale [4].



Fessure di giunto [2]

Fessure di giunto

Questa tipologia concerne la formazione di fessure longitudinali e trasversali in corrispondenza dei giunti relativi alla posa in opera dello strato superficiale della pavimentazione. Contestualmente alle aperture in corrispondenza dei giunti, può innescarsi una fessurazione secondaria parallela [4].

Il livello di severità dipende dalla larghezza della fessurazione lungo il giunto (considerando valori di soglia pari a 2, 6 e 10

	mm) e dalla eventuale presenza di disgregazione del materiale sui bordi [2]. Tali ammaloramenti presentano in genere un andamento rettilineo [4].
 <i>Fessurazione a blocchi [2]</i>	Fessurazione a blocchi Presenza sulla superficie della pavimentazione di fessurazioni che formano dei blocchi in genere di forma rettangolare [2]. Tale tipologia di dissesti non risulta circoscritta alle zone interessate dal passaggio delle ruote dei veicoli, ma si sviluppa in genere su aree estese [4]. Il livello di severità dipende dai blocchi presenti (se a maglia chiusa o meno ed in funzione della dimensione media del lato maggiore) [2].
 <i>Fessurazione ai bordi [2]</i>	Fessure ai bordi Tale tipologia comprende la generazione di fessure ai bordi della pavimentazione. Si tratta di fessure di tipo longitudinale oppure a maglie in presenza di degrado particolarmente accentuato. Il livello di severità dipende dalla larghezza della fessurazione (considerando valori di soglia pari a 2 e 10 mm) e dall'eventuale distacco e disgregazione del materiale ai bordi delle fessure [2].
 <i>Fessurazione a pelle di coccodrillo [4]</i>	Fessurazione a pelle di coccodrillo Si tratta di fessurazioni che si originano in corrispondenza delle tracce delle ruote e che mostrano problematiche strutturali [4]. Tale dissesto, caratterizzato dalla presenza di blocchi a maglie strette, mostra un aspetto del tutto simile a quello presente sulla pelle dei coccodrilli. Rispetto alle fessure a blocchi, quelle a pelle di coccodrillo presentano maglie molto più fitte [4]. Il livello di severità viene associato all'entità della fessurazione e dei possibili avvallamenti presenti [2, 4].

III. Indicatori di stato delle pavimentazioni più diffusi in letteratura

Questa sezione è dedicata alla descrizione degli indicatori di stato di una pavimentazione stradale maggiormente utilizzati in letteratura [7, 8].

Tali parametri possono essere classificati in:

- **Specifici** se fanno riferimento ad una determinata caratteristica della pavimentazione, che può essere ad esempio la tessitura, l'aderenza, la regolarità longitudinale o quella trasversale;
- **Sintetici** o **globali** quando forniscono una caratterizzazione sintetica dello stato della pavimentazione o di alcune sue caratteristiche in maniera congiunta, rivestendo un ruolo fondamentale nella fase di pianificazione degli interventi di manutenzione.

Di seguito verrà inizialmente focalizzata l'attenzione sui principali indici specifici adottati e, successivamente, sugli indicatori di stato globali più diffusi in letteratura poiché, rispetto a quelli specifici, consentono di avere una visione più completa dello stato della pavimentazione e della sua evoluzione nel tempo.

III.I INDICATORI SPECIFICI

Tessitura di una pavimentazione stradale

La tessitura di una pavimentazione stradale viene definita come la deviazione della superficie della pavimentazione da una vera superficie planare, con lunghezze d'onda minori di 0.5m [9]. La World Road Association (PIARC) ha definito diverse classi di tessitura [10]:

- **Microtessitura** ($\lambda < 0.5mm$);
- **Macrotessitura** ($0.5mm < \lambda < 50mm$);
- **Megatessitura** ($50mm < \lambda < 0.5m$);

che, insieme alle irregolarità, vanno ad incidere su numerose proprietà superficiali del manto stradale e sul comfort di guida come mostrato in Figura 3, nella quale le tonalità più chiare indicano effetti favorevoli mentre quelle più scure quelli sfavorevoli:

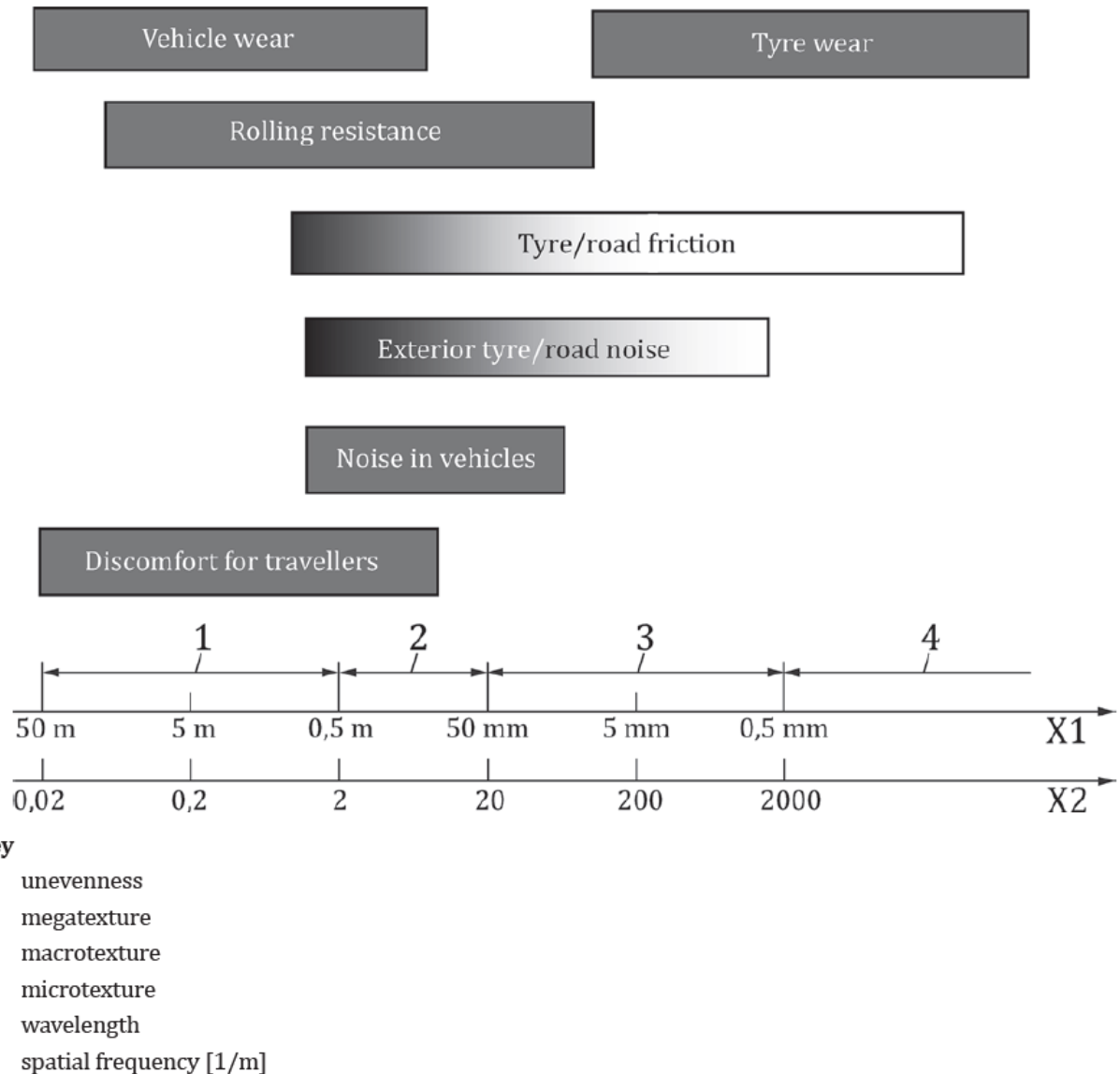


Figura 3: Range in termini di lunghezze d'onda e di frequenza spaziale di tessitura ed irregolarità ed effetti su proprietà superficiali e comfort di guida [9]

Livelli elevati di micro e macrotessitura garantiscono una buona aderenza dello pneumatico, mentre ad elevati valori di irregolarità sono associati marcati peggioramenti delle condizioni di guida.

Tra gli indicatori più diffusi di macrotessitura vi è l'MPD (Mean Profile Depth) definito dalla norma ISO 13473-1-2019 [9] e misurato attraverso l'utilizzo di profilometri laser.

Regolarità longitudinale

Uno degli indicatori di regolarità longitudinale maggiormente diffusi è l'IRI (International Roughness Index) [11], che rappresenta la risposta del veicolo al profilo stradale longitudinale.

L'IRI, espresso in mm/m o m/km, rappresenta lo spostamento verticale del sistema di sospensioni del veicolo su una distanza specifica, considerando una velocità di 80 km/h.

La scala di valutazione parte dal valore pari a 0 (che corrisponde ad una regolarità perfetta della pavimentazione) e risulta aperta verso l'alto, al crescere delle irregolarità [7,12].

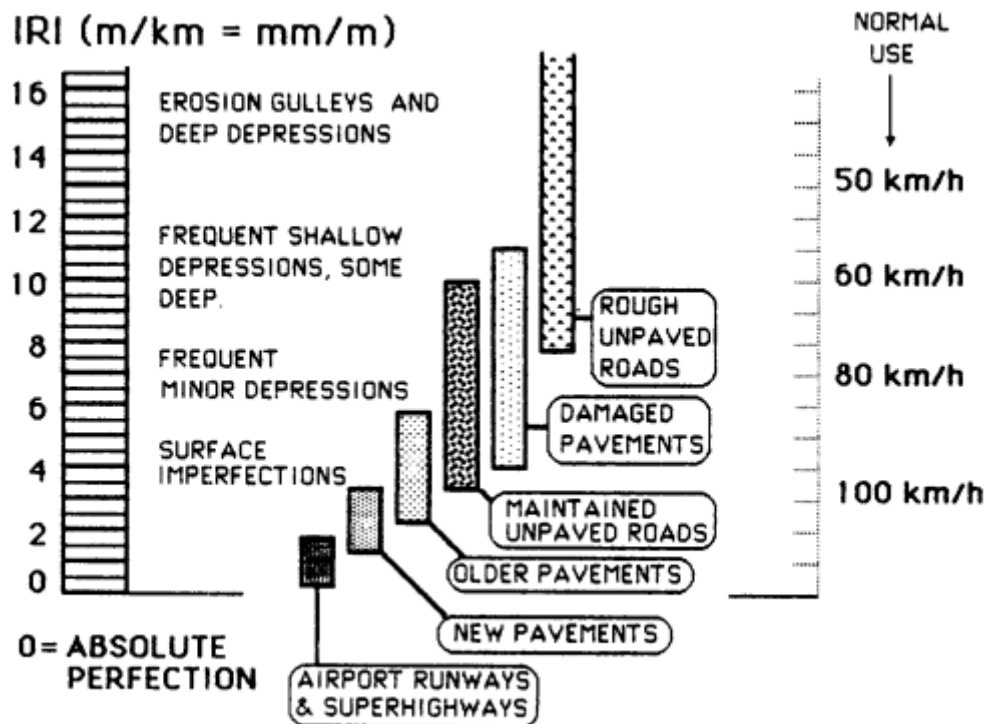


Figura 4: Scala di valutazione IRI [7, 12]

Il calcolo di tale indicatore può essere effettuato utilizzando un modello matematico detto "quarter-car model", nel quale la risposta del veicolo viene descritta attraverso un sistema di masse, molle ed elementi smorzanti (mostrato in Figura 5). Il veicolo di misura viene rapportato, tramite un processo di calibrazione, ad uno specifico veicolo di riferimento, detto "golden car model" [13].

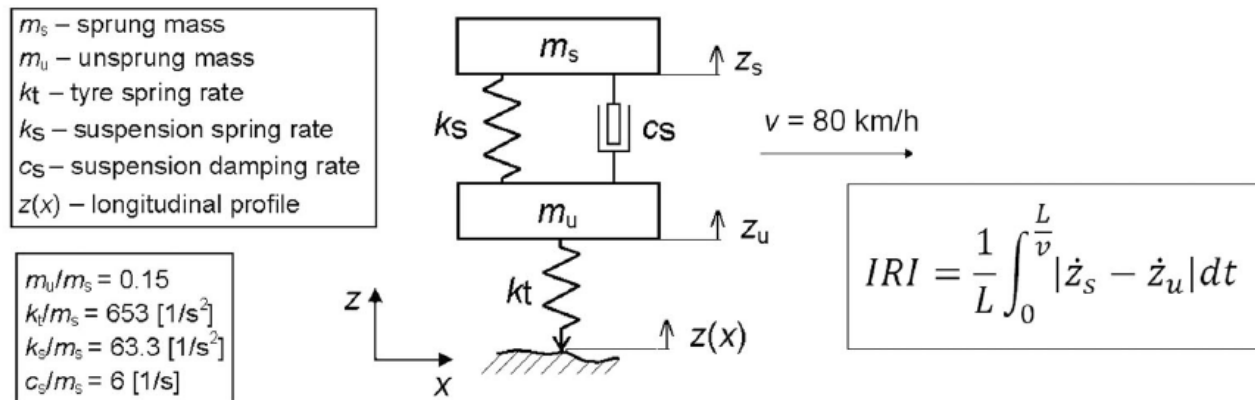


Figura 5: Quarter-car model [11]

Le misure di tale indicatore possono anche essere effettuate con metodiche che prevedono l'utilizzo di accelerometri e sensori di posizione GPS installati direttamente sul mezzo di prova [14] oppure di sensori di pressione posizionati all'interno dello pneumatico [15].

Regolarità trasversale

Per la valutazione della regolarità trasversale si fa riferimento alla deviazione verticale da un profilo trasversale ideale rappresentato da una retta [7]. Si tratta di un parametro principalmente rilevante in termini di sicurezza stradale, seppur influenzi in maniera secondaria anche il livello di confort di guida. Nello specifico, infatti, la presenza di difetti del profilo trasversale con generazione di ormaie può comportare:

- un incremento del rischio di acquaplaning dovuto all'eventuale raccolta di acqua in corrispondenza delle ormaie;
- effetti negativi sul comportamento dinamico dei veicoli;
- una maggiore concentrazione dei carichi sulle ormaie con possibile accelerazione del processo di degrado delle zone interessate.

I rilievi di tale parametro possono essere effettuati con l'utilizzo di semplici stadi e possono prevedere specifiche apparecchiature per la misura statica o dinamica di profili trasversali.



Regione Toscana

Aderenza

L'aderenza costituisce uno dei parametri che fortemente influenzano la sicurezza di marcia dei veicoli. Tale indicatore risulta dipendere da numerosi fattori legati alle caratteristiche del manto stradale (come la tessitura superficiale), alle caratteristiche degli pneumatici (tipologia e pressione di gonfiaggio), alle condizioni ambientali (come la presenza di acqua, di olii, etc), alle condizioni di guida (velocità del veicolo, tipo di manovra effettuata) [16].

Le misure di aderenza possono essere effettuate con:

- Metodi statici, come misurazione della resistenza allo slittamento/derapaggio di una superficie con l'apparecchio portatile a pendolo [17];
- Metodi dinamici, attraverso ad esempio l'apparecchiatura SCRIM (Sideway Coefficient Road Investigating Machine) che presenta uno pneumatico di misura che ruota in posizione obliqua rispetto alla direzione di marcia. Tale apparecchiatura consente la misura in continua del coefficiente di aderenza trasversale (CAT) [7].

III.II INDICATORI SINTETICI

PCI (Pavement Condition Index)

Uno degli indici sintetici maggiormente diffusi ed utilizzati per descrivere lo stato di una pavimentazione è il Pavement Condition Index (PCI). Tale indice, sulla base degli ammaloramenti osservati sulla superficie, dà una valutazione della condizione attuale della pavimentazione, indicandone anche integrità strutturale e condizioni operative superficiali. Il metodo di calcolo del PCI, sviluppato dallo U.S. Army Corps of Engineers e specificato nella norma ASTM D6433 nel caso di pavimentazioni stradali, è pertanto basato su una ispezione visiva standardizzata della condizione della pavimentazione. Tale ispezione tiene conto della tipologia di ammaloramenti presenti sulla superficie stradale, considerandone il grado di severità e la densità. Il valore finale di tale indicatore è descritto mediante una scala numerica compresa tra 0-100 (mostrata in Figura 6), dove il valore 100 rappresenta la migliore condizione possibile, mentre il valore 0 quella peggiore possibile [6,8, 18, 19].

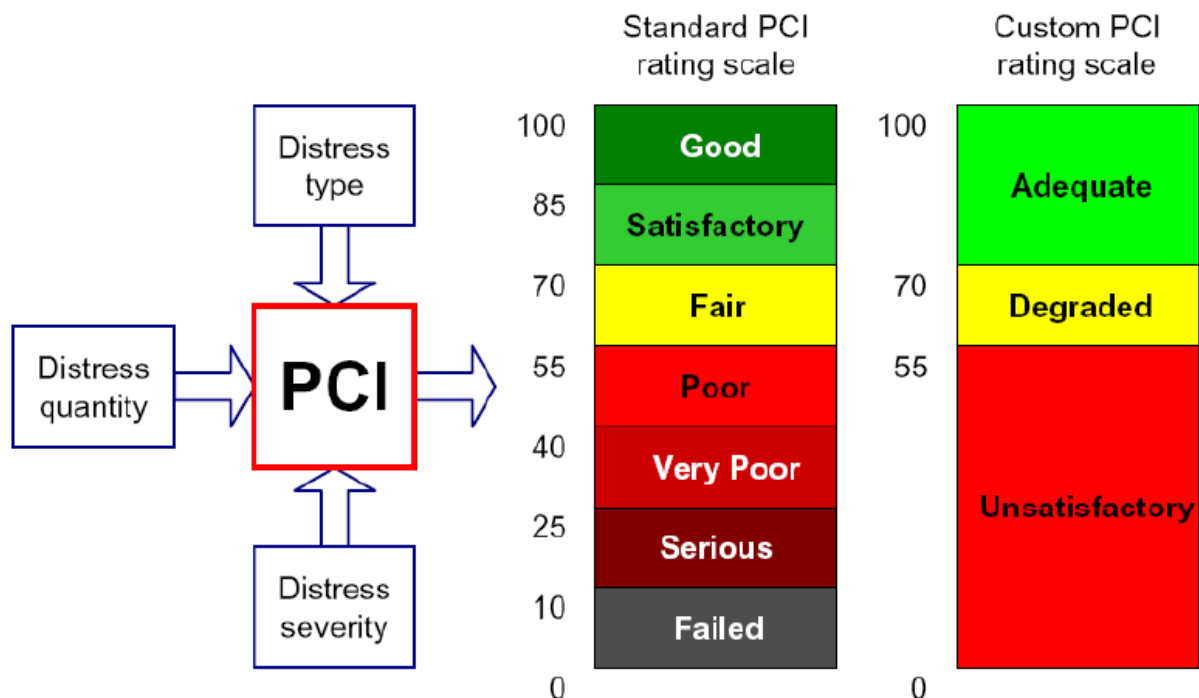


Figura 6: Scala di valutazione del PCI [18]

Per la valutazione dell'indice PCI, la rete stradale viene ripartita in sezioni, che vengono suddivise a loro volta in unità campione, caratterizzate da dimensioni convenzionali (pari a $225 \pm 90 \text{ m}^2$ nel caso di pavimentazioni in conglomerato bituminoso). Le ispezioni visive vengono effettuate sulle unità campione. Il numero minimo di unità campione da ispezionare all'interno di una data sezione deve essere tale da ottenere una stima statisticamente adeguata del PCI della sezione. Per ciascuna unità ispezionata viene effettuato il calcolo del PCI a partire dalla registrazione dei dissesti rilevati.

Nello specifico, si procede inizialmente al calcolo della quantità totale di ciascuna tipologia di ammaloramento e relativo livello di severità. Le unità di misura di tali quantità possono essere diverse (metri quadri, metri lineari, numero di occorrenze) a seconda della tipologia del dissesto. Successivamente, viene effettuato il calcolo della densità percentuale (rispetto all'area totale dell'unità campione) di ciascuna combinazione di tipologia di ammaloramento e livello di severità.

Per ciascuna combinazione (tipo di ammaloramento e livello di severità), si procede poi alla determinazione del valore DV (deduct value) interpolando apposite curve con i valori di densità percentuale calcolati in precedenza. Per ogni tipologia di dissesto ci sono tre curve, una per ciascun livello di severità (L-Low, M-Medium, H-High), che correlano i valori DV a quelli di densità percentuale [6].

A partire dai valori DV calcolati in precedenza, si procede al calcolo del max CDV (maximum correct deduct value). Se nessuno o solo uno dei valori DV supera il valore pari a 2, si effettua la somma di tutti DV ed il valore totale ottenuto viene usato al posto del max CDV per determinare il PCI.

Se, invece, è presente più di un valore DV superiore a 2, il max CDV viene ottenuto tramite una procedura iterativa.

Il valore PCI relativo alla singola unità campione si ottiene sottraendo a 100 il valore max CDV secondo la seguente formula:

$$PCI = 100 - \max CDV$$

Il valore PCI di una intera sezione viene calcolato effettuando la media pesata dei valori ottenuti nelle singole unità campione seguendo la procedura specifica nella normativa di riferimento.

La successiva Figura 7 mostra nuove curve di interpolazione proposte da uno specifico studio che amplia, in ambito urbano, la casistica di ammaloramenti prevista dalla norma ASTM D6433 [19].

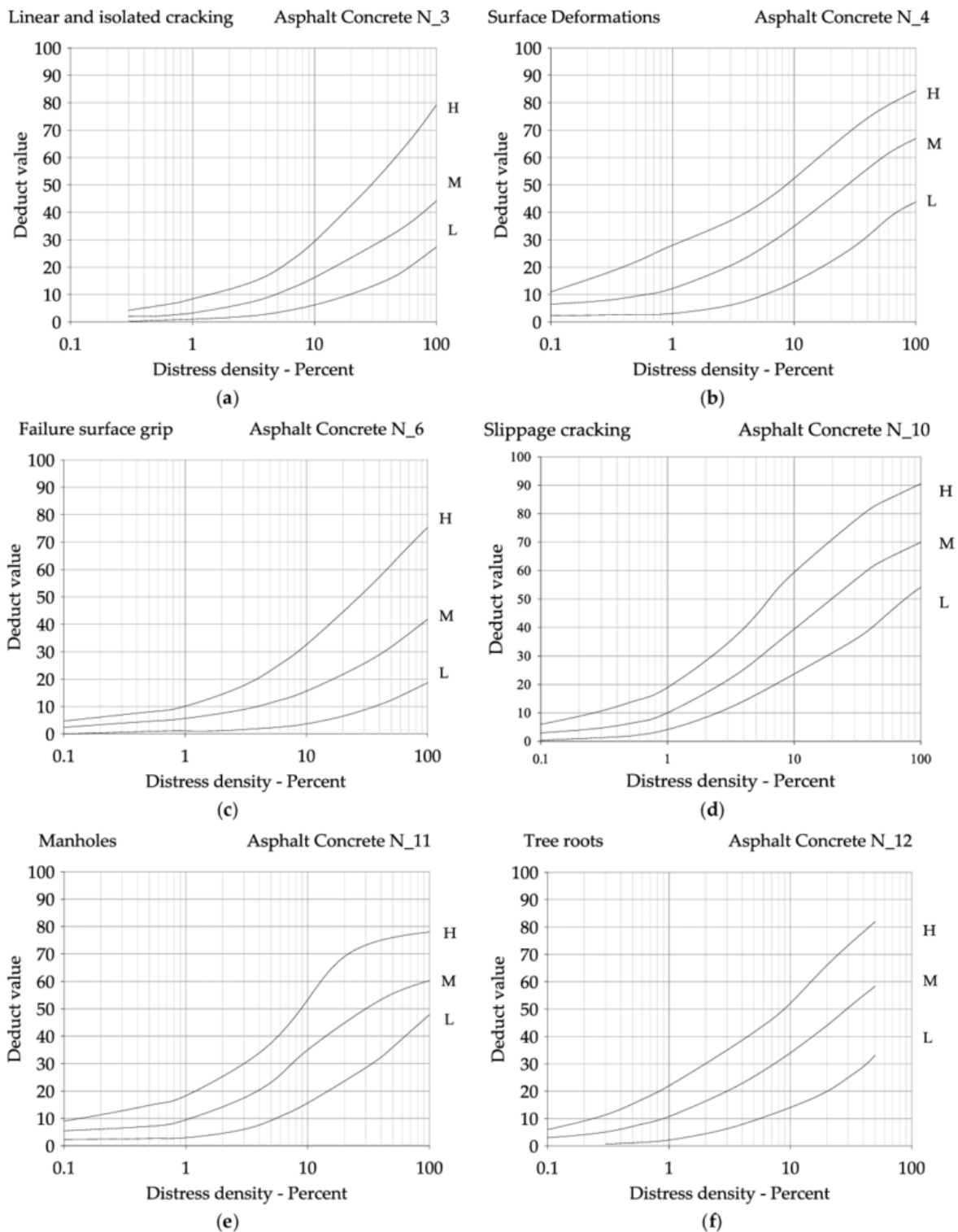


Figura 7: Valori DV (Deduct values) per ammaloramenti in ambito urbano [19].

PCR (Pavement Condition Rating)

Anche l'indice PCR (Pavement Condition Rating) viene calcolato a partire da una ispezione visiva degli ammaloramenti stradali. Il valore di tale indicatore, variabile nel range 0-100, è dato dalla seguente espressione [20]:

$$PCR = 100 - \sum_{i=1}^n Deduct_i$$

dove n rappresenta il numero di ammaloramenti osservati, mentre il termine Deduct è pari al prodotto dei pesi connessi al tipo di ammaloramento, al grado di severità e all'estensione:

$$Deduct = (weight\ for\ distress) \cdot (Wt.\ for\ severity) \cdot (Wt.\ for\ extent)$$

I valori Deduct sono una funzione della tipologia dell'ammaloramento, del grado di severità e dell'estensione. Nel caso di pavimentazioni flessibili, la Figura 8 mostra la valutazione del grado di severità e dell'estensione per tipologia di dissesto, mentre la successiva Figura 9 riporta i pesi relativi alla di tipologia di ammaloramento, al grado di severità ed all'estensione.

DISTRESS	Distress Weight	SEVERITY*			EXTENT**			STR ***
		L	M	H	O	F	E	
RAVELING	10	Slight Loss of Sand	Open Texture	Rough or pitted	<20%	20-50%	>50%	
BLEEDING	5	not rated	Bit and Agg visible	Black Surface	<10%	10-30%	>30%	
PATCHING	5	<1 ft ²	<1 yd ²	>1 yd ²	<10/mile	10-20/mile	>20/mile	
DEBONDING	5	depth <1" area <1 yd ²	<1", >1 yd ² >1", <1 yd ²	>1" and >1 yd ²	<5/mile	5-10/mile	>10/mile	
CRACK SEALING DEFIC.	5	Not considered			<50%	>50%	No Sealant	
RUTTING	10	1/8" - 3/8"	3/8" - 3/4"	> 3/4"	<20%	20-50%	>50%	• •
SETTLEMENTS	0	Noticeable effect on ride	Some Discomfort	Poor Ride	<2/mi	2-4/mi	>4/mi	
POTHOLE	10	depth <1" area <1 yd ²	<1", >1 yd ² >1", <1 yd ²	>1" and >1 yd ²	<5/mile	5-10/mile	>10/mile	• •
WHEEL TRACK CRACKING	15	Single/multiple cracks <1/4"	Multiple cracks >1/4"	Alligator >1/4" Spalling with	<20%	20-50%	>50%	• •
BLOCK & TRANSVERSE CRACKING	10	> 6' X 6' or Transverse Crk.	6' x 6' to 3' x 3'	< 3' x 3'	<20%	20-50%	>50%	
LONGITUDINAL CRACKING	5	Single, <1/4", no Spalling	single/multiple 1/4-1", some Spalling	Multiple, >1", Spalling	< 50' per 100'	50-150' per 100'	>150' per 100'	• •
EDGE CRACKING	10	Tight, <1/4"	>1/4", some Spalling	>1/4", moderate Spalling	<20%	20-50%	>50%	• •
THERMAL CRACKING	10	<1/4"	1/4-1"	>1"	CS > 200'	CS 75-200'	CS <75'	

*L = LOW
M = MEDIUM
H = HIGH

**O = OCCASIONAL
F = FREQUENT
E = EXTENSIVE

***STR = DISTRESS INCLUDED IN STRUCTURAL DEDUCT CALCULATIONS.

Figura 8: Valutazione del grado di severità e dell'estensione dei dissesti nel caso di pavimentazione flessibile [20]

DISTRESS	DISTRESS WEIGHT	SEVERITY WT.*			EXTENT WT.**			DEDUCT POINTS***
		L	M	H	O	F	E	
RAVELING	10	0.3	0.6	1	0.5	0.8	1	
BLEEDING	5	0.8	0.8	1	0.6	0.9	1	
PATCHING	5	0.3	0.6	1	0.6	0.8	1	
DEBONDING	5	0.4	0.7	1	0.5	0.8	1	
CRACK SEALING DEFICIENCY	5	1	1	1	0.5	0.8	1	
RUTTING	10	0.3	0.7	1	0.6	0.8	1 • •	
SETTLEMENT	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
POTHOLE	10	0.4	0.8	1	0.5	0.8	1 • •	
WHEEL TRACK CRACKING	15	0.4	0.7	1	0.5	0.7	1 • •	
BLOCK AND TRANSVERSE CRACKING	10	0.4	0.7	1	0.5	0.7	1	
LONGITUDINAL CRACKING	5	0.4	0.7	1	0.5	0.7	1 • •	
EDGE CRACKING	10	0.4	0.7	1	0.5	0.7	1 • •	
THERMAL CRACKING	10	0.4	0.7	1	0.5	0.7	1	
*L = LOW **O = OCCASIONAL M = MEDIUM F = FREQUENT H = HIGH E = EXTENSIVE								
TOTAL DEDUCT =								
SUM OF STRUCTURAL DEDUCT (•) =								
100 - TOTAL DEDUCT = PCR =								

Figura 9: Pesi relativi alla tipologia di ammaloramento, al grado di severità ed all'estensione nel caso di pavimentazione flessibile [20]

PSI (Present Serviceability Index)

Tra gli indici globali maggiormente diffusi vi è il PSI (Present Serviceability Index), sviluppato nell'ambito delle prove AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) e che rappresenta un eccellente indicatore globale dello stato della pavimentazione e della sua evoluzione nel corso del tempo [7].

La scala di valutazione varia dal valore massimo pari a 5 (condizione eccellente della pavimentazione) al valore pari a 0 (condizione pessima).

Dal punto di vista operativo, nel caso di pavimentazioni flessibili, il valore iniziale del PSI viene generalmente consigliato pari a 4.2 (per tenere conto delle imperfezioni presenti all'inizio della vita utile), mentre il valore finale consentito dipende dalla tipologia di strada (viene considerato un valore pari a 2.5 per le strade di grande comunicazione e per le autostrade, pari a 2 per la viabilità principale) [21].

Per il calcolo di tale indicatore si tiene conto della regolarità superficiale, della presenza di ormaie (nel caso di pavimentazioni in conglomerato bituminoso), della presenza di fessurazioni e rappezzi.

Nel caso di pavimentazioni flessibili, pertanto, viene utilizzata la seguente formula:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \cdot \text{Log}(1 + SV) - 1,38 \cdot RD^2 - 0,01 \cdot \sqrt{(C + P)}$$

i cui termini sono di seguito specificati:

SV (Slope Variance): varianza della pendenza del profilo longitudinale (indicatore di regolarità longitudinale),

RD (Rut Depth): profondità media delle ormaie,

C: fessurazioni per unità di superficie,

P: rappezzi e buche per unità di superficie.

I_1 (Indice Sintetico Globale)

L'Indice Sintetico Globale I_1 è specificato nella normativa svizzera SN 640925 per definire lo stato superficiale della pavimentazione [7].

Tale indicatore viene calcolato sulla base del rilievo delle seguenti categorie di degradi:

- scivolosità della superficie (perdita di aderenza per risalita di legante o levigazione degli aggregati);
- degradi del rivestimento (sgranamento, distacchi superficiali, buche, fessure trasversali, fessure a blocchi, fessure di giunto);
- deformazioni (avvallamenti, corrugamenti, ormaie);
- degradi strutturali (fessurazioni longitudinali, a pelle di coccodrillo);
- degradi delle riparazioni.

L'indice I_1 , che può assumere valori compresi tra 0 (nel caso di assenza di ammaloramenti) e 5 (condizioni pessime della pavimentazione), viene calcolato attraverso la seguente formula:

$$I_1 = \frac{\sum(G_i \cdot M_i)}{10}$$

nella quale il termine M_i costituisce il peso ponderale attribuito in funzione della categoria di ammaloramento, mentre il termine G_i viene valutato in funzione della classe di severità e di estensione della singola tipologia di ammaloramento.

Nel caso in cui il termine $\sum(G_i \cdot M_i)$ sia maggiore del valore 50, l'indice I_1 viene posto pari a 5.

Sulla base di quanto previsto dalla norma SN 640925, la successiva Figura 10 raggruppa differenti tabelle [7] concernenti: i) i criteri di valutazione della classe di severità e di estensione dei degradi; ii) i valori dei pesi ponderali M_i per le differenti categorie di degrado; iii) i valori G_i sulla base della classe di severità ed estensione.

Classe di severità	Severità del degrado superficiale	Classe di estensione	Estensione	Percentuale dell'area totale interessata dal degrado
1	Degrado lieve	0	Nessun degrado	0
2	Degrado medio	1	Degrado molto localizzato	<10%
3	Degrado severo	2	Degrado da localizzato ad esteso	dal 10% al 50 %
		3	Degrado molto esteso	> 50%

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

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

Figura 10: Classi di severità e di estensione dei degradi, pesi ponderali M_i e valori G_i previsti dalla norma SN 640925 [7]

IV. Contributo della condizione delle pavimentazioni sulla generazione degli incidenti stradali.

Questa sezione è dedicata all'importante tematica relativa al contributo della condizione delle pavimentazioni sulla generazione degli incidenti stradali.

La sicurezza stradale risulta essere un fenomeno caratterizzato da particolare complessità che prevede l'interazione di diversi fattori: l'uomo, il veicolo e la strada.

Con riferimento al fattore strada, le caratteristiche dei materiali e le modalità realizzative di una pavimentazione stradale vanno ad incidere sulla sicurezza di marcia, sul comfort di guida, sulla durata delle prestazioni, sul costo del ciclo di vita e sulla sostenibilità ambientale della pavimentazione stessa [22]. Tale dipendenza si esplica attraverso le caratteristiche meccanico-volumetriche e quelle funzionali/superficiali della pavimentazione.

Studi proposti in letteratura hanno comparato le cause degli incidenti stradali in differenti paesi, considerando in particolare le percentuali degli stessi imputabili all'errore umano, alle condizioni stradali e a quelle del veicolo [23].

Dall'analisi effettuata e riportata di seguito in Figura 11, emerge come tali percentuali risultino sensibilmente variabili da nazione a nazione, in funzione del grado di sensibilizzazione sul tema della sicurezza stradale di ciascun paese, di aspetti ingegneristici legati alla progettazione di infrastrutture e veicoli, della severità delle forze dell'ordine.

Causes of Road Accident (%)				
Human error	Road Condition	Vehicle Condition	Other factors	Country
75.4	14.5	10.2	-	South Africa
85.5	2.9	5.1	6.4	Kenya
80	12.7	7.8	-	South Africa
90	4	8.4	-	Ghana
75.7	2.9	17.1	-	Congo
80.6	13.2	6.2	-	Malaysia
67	29	4	-	Saudi Arabia
29	64	7		Malaysia

Figura 11: Cause degli incidenti stradali riportati in [23]

Tra le più importanti caratteristiche superficiali della pavimentazione prese in considerazione nella generazione di incidenti vi sono la regolarità longitudinale, l'ormaiamento e la resistenza allo slittamento [23].

La Figura 12 fa riferimento ad una review [23] concernente numerosi studi relativi all'influenza dei valori di regolarità longitudinale, in termini di indicatore IRI, sulla sicurezza stradale [23].

Dalla figura è possibile notare come alcuni tra gli studi considerati evidenzino l'esistenza di una significativa correlazione positiva tra i dati di incidentalità ed i valori di IRI, mostrando come strade che presentano bassi valori di IRI siano caratterizzate da meno incidenti rispetto a strade simili con alti valori di IRI.

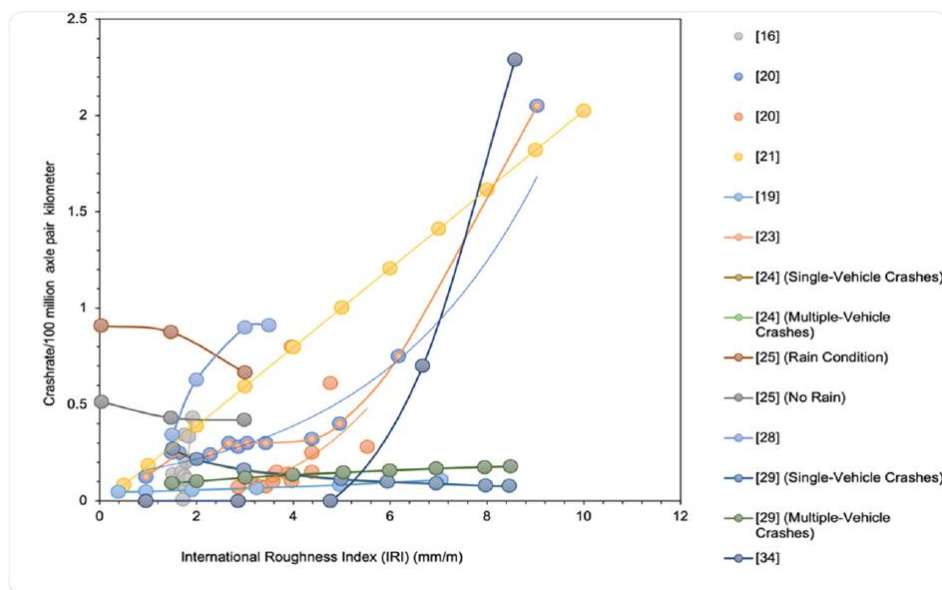


Figura 12: Correlazione tra dati di incidentalità stradale ed indicatore IRI [23]

Inoltre, altri studi considerati in [23], hanno valutato effetti differenti sui dati di incidentalità relativi a veicoli singoli e su quelli caratterizzati dal coinvolgimento di più veicoli. In particolare, nel primo caso, alla crescita delle irregolarità corrisponde una diminuzione del tasso di incidentalità, dovuta al comportamento del conducente che tende ad essere molto prudente ed a ridurre la velocità con conseguente riduzione del rischio di incidente. Nel caso degli incidenti con più veicoli, invece, ad una crescita dei valori di IRI corrisponde una crescita del tasso di incidentalità in accordo con la correlazione positiva vista in precedenza.

L'aderenza sul bagnato costituisce un parametro cruciale in termini di sicurezza stradale, poiché secondo alcuni studi [23, 24] quasi il 20% degli incidenti stradali si verifica in condizioni di pavimentazione bagnata.

Le percentuali di incidenti su fondo bagnato risultano più elevate laddove vi è una maggiore richiesta di aderenza, come tratti con curve orizzontali [25].

La Figura 13 mostra la correlazione tra dati di incidentalità e valore dell'indicatore sintetico PCI in ambito urbano [26]. In particolare, secondo tale studio, al diminuire dei valori di PCI corrisponde una crescita dei valori di incidentalità secondo una legge parabolica.

Si può notare anche una crescita di incidenti per valori di PCI superiori a 85, che potrebbe essere imputata ad una maggiore sicurezza da parte dei conducenti per le migliori condizioni della strada con conseguente incremento delle velocità e, di conseguenza, degli incidenti [26].

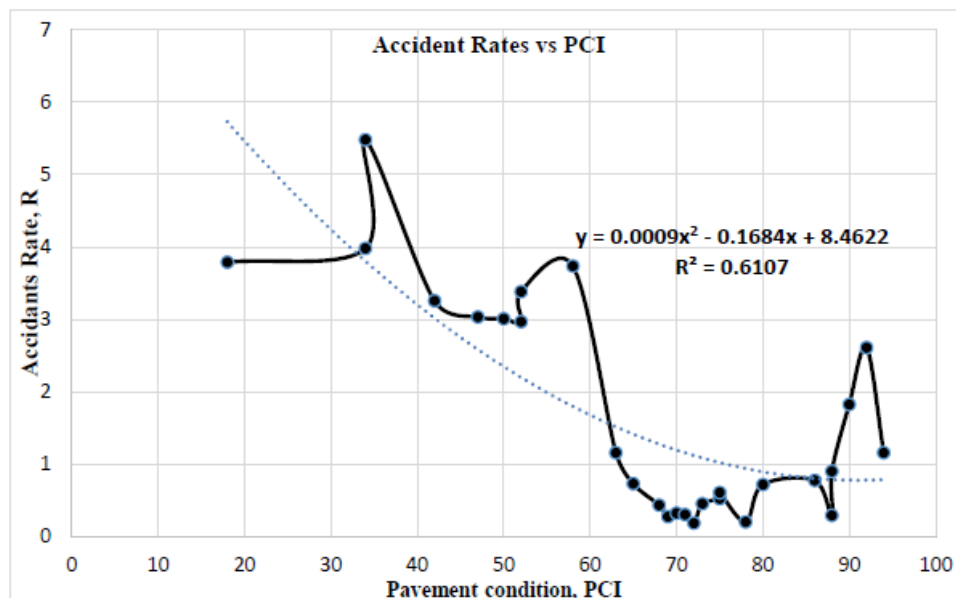


Figura 13: Correlazione tra dati di incidentalità stradale ed indicatore PCI [26]

La seguente Figura 14 riporta una possibile classificazione delle differenti tipologie di ammaloramenti in base agli effetti sul comfort di guida e sulla sicurezza di marcia, considerando una scala variabile tra 0 (effetto basso) e 2 (effetto massimo) [8].

	DISTRESS	SEVERITY	IMPACT ON SAFETY	IMPACT ON COMFORT	TYPE OF INFORMATION
Cracking	FATIGUE CRACKING	L	0	0	2D 3D
		M	0	1	
		H	1	2	
	BLOCK CRACKING	L	0	0	2D 3D
		M	0	1	
		H	1	2	
	EDGE CRACKING	L	0	0	2D 3D
		M	0	0	
		H	1	1	
	LONGITUDINAL AND TRANSVERSE CRACKING	L	0	0	2D 3D
		M	0	1	
		H	1	2	
JOINT REFLECTION CRACKING	L	0	0	2D 3D	
	M	0	0		
	H	1	1		
SLIPPAGE CRACKING	L	0	0	2D	
	M	0	0		
	H	1	1		
Visco Plastic deformations	BUMPS AND SAGS	L	0	1	3D
		M	0	1	
		H	1	2	
	RUTTING	L	0	1	3D
		M	0	1	
		H	1	2	
	CORRUGATIONS	L	0	1	3D
		M	1	1	
		H	2	2	
	DEPRESSIONS	L	0	0	3D
		M	1	0	
		H	2	1	
	POTHLES	L	1	1	2D 3D
		M	1	1	
		H	2	2	
	SWELL	L	0	0	2D 3D
		M	0	0	
		H	1	2	
	LANE / SHOULDER DROP OFF	L	0	0	3D
		M	1	0	
		H	2	1	
	SHOVING	L	0	0	2D 3D
		M	0	1	
		H	1	2	
Surface defects	BLEEDING	L	1	0	2D
		M	1	0	
		H	2	0	
	POLISHED AGGREGATE	L	1	0	2D
		M	1	0	
		H	2	0	
RAVELING	L	1	0	2D	
	M	1	0		
	H	2	0		
Others	PATCHING-UTILITY CUT PATCHING	L	0	0	2D
		M	0	0	
		H	1	1	
	RAILROAD CROSSING *	L	1	1	2D
		M	1	1	
		H	2	2	
	MANHOLE	L	1	1	2D
		M	1	1	
		H	2	2	
Note. * Poweredtwo Wheeler's safety is particularly affected by the presence of railroad crossing					

Figura 14: Classificazione degli ammaloramenti e relativa influenza su comfort di guida e sicurezza [8]

V. Conclusioni

Il presente documento ha riguardato lo stato dell'arte in materia di ammaloramenti stradali. Con riferimento a tale tematica, in letteratura sono presenti numerosi cataloghi e classificazioni dei dissesti stradali specificati all'interno di normative o previsti da Enti Pubblici o gestori delle infrastrutture. Alla luce dei documenti visionati, nella prima parte del documento, sono state descritte le principali tipologie di ammaloramento della pavimentazione stradale, facendo riferimento in particolare a quanto riportato nei cataloghi dei dissesti della Regione Toscana e della Regione Lombardia.

Nel prosieguo del documento, l'attenzione è stata spostata sui principali indicatori di stato delle pavimentazioni maggiormente diffusi in letteratura. Si tratta di parametri che possono essere specifici (quando fanno riferimento ad una determinata caratteristica della pavimentazione) oppure sintetici (o globali, se danno una caratterizzazione sintetica dello stato della pavimentazione o di alcune sue caratteristiche in modo congiunto). In relazione a quanto previsto nello sviluppo della proposta progettuale, gli indicatori di stato globale sono quelli che risultano di maggiore interesse, poiché permettono di avere una visione più completa dello stato della pavimentazione e della sua evoluzione nel tempo. Tra quelli trattati, si segnalano gli indici PCI (Pavement Condition Index) e I_1 (Indice Sintetico Globale).

La parte finale è stata dedicata alla discussione del contributo della condizione delle pavimentazioni sulla generazione degli incidenti stradali. Gli studi riportati hanno evidenziato la forte correlazione tra dati di incidentalità e stato della pavimentazione, tanto in termini di indicatori specifici (come l'IRI) che globali (PCI).



Regione Toscana

Bibliografia

- [1] N. K. Tamrakar, Overview on causes of flexible pavement distresses. Bulletin of Nepal Geological Society, 2019, vol. 36, ISSN 2676-1386 (Print); ISSN 2676-1394 (Online)
- [2] Catalogo per l'identificazione visiva dei dissesti superficiali di pavimentazioni stradali flessibili, Regione Toscana, 2018
- [3] I Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture. Volume V. Anas Gruppo FS Italiane, febbraio 2019
- [4] Catalogo dei dissesti delle pavimentazioni stradali. Allegato B, D.g.r. 25 gennaio 2006, n. 8/1790, Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia 1° Suppl. Straordinario al n. 8 - 21 febbraio 2006
- [5] J. S. Miller, W. Y. Bellinger, Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program, Report No. FHWA-HRT-13-092, May 2014
- [6] ASTM D6433-24, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys
- [7] Criteri per lo sviluppo di sistemi di gestione della manutenzione delle pavimentazioni stradali. Allegato D, D.g.r. 25 gennaio 2006, n. 8/1790, Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia 1° Suppl. Straordinario al n. 8 - 21 febbraio 2006
- [8] A. Ragnoli, M. R. De Blasiis, A. Di Benedetto, Pavement Distress Detection Methods: A Review, *Infrastructures* 2018, 3, 58; doi:10.3390/infrastructures3040058
- [9] ISO 13473-1-2019, Characterization of pavement texture by use of surface profiles.
- [10] Piarc. (1987), Optimization of Surface Characteristics. Report to the XVIIIth World Road Congress 1987 in Brussels, Belgium, from the Technical Committee on Surface Characteristics, World Road Association (PIARC), Paris, France
- [11] P. Múčka, International Roughness Index specifications around the world, *Road Materials and Pavement Design*, 2017, Vol. 18, No. 4, 929-965
- [12] M.W. Sayers, T.D. Gillespie, W.D. Paterson. Guidelines for the Conduct and Calibration of Road Roughness Measurements. World Bank Technical Paper No. 46, The World Bank, Washington DC, 1986

- [13] T. D. Gillespie, M. W. Sayers, e L. Segel, *Calibration of response-type road roughness measuring systems*. in Report, no. 228. Washington, D.C: Transportation Research Board, National Research Council, 1980.
- [14] Y. Du, C. Liu, D. Wu, e S. Jiang, «Measurement of International Roughness Index by Using Z -Axis Accelerometers and GPS», *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2014, Article ID 928980, 10 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/928980>
- [15] Y. Zhao, H. F. Wu, J. G. McDaniel, e M. L. Wang, Evaluating road surface conditions using dynamic tire pressure sensor, *Proceedings of the SPIE*, Volume 9063, id. 90630J 7 pp. (2014)
- [16] S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia, *Analisi critica del fenomeno dell'aderenza in campo stradale e ferroviario*, Quaderno n.88, Università degli studi di Catania, 1996
- [17] UNI EN 13036-4:2011, *Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali - Metodi di prova - Parte 4: Metodo per la misurazione della resistenza allo slittamento/derapaggio di una superficie: Metodo del pendolo*
- [18] *Lezioni del corso di Gestione e Manutenzione delle Pavimentazioni Stradali, Pianificazione della Manutenzione mediante il Pavement Condition Index*, Dr. Ing. Emiliano Pasquini, Dipartimento ICEA - Università Politecnica delle Marche
- [19] G. Loprencipe, A. Pantuso, *A Specified Procedure for Distress Identification and Assessment for Urban Road Surfaces Based on PCI*, *Coatings* 2017, 7, 65; doi:10.3390/coatings7050065
- [20] *Pavement Condition Rating System*, Ohio Department of Transportation, April 2006
- [21] G. Tesoriere, *Strade-Ferrovie-Aeroporti*, Volume secondo, *Le opere in terra, le sovrastrutture, gli impianti*, 1997, UTET Torino.
- [22] F.G. Praticò, A. Moro, *Sulla relazione tra porosità e permeabilità per conglomerati bituminosi porosi: Modellazione e sperimentazione*, XXV Convegno Nazionale Stradale, Associazione mondiale della strada, AIPCR, 4-7 Ottobre 2006, Napoli.
- [23] R. Mkwata, E. E. M. Chong, *Effect of pavement surface conditions on road traffic accident - A Review*, *E3S Web of Conferences* 347, 01017 (2022), ICCEE 2022
- [24] R. McCarthy, G. Flintsch, E. de León Izeppi, *Impact of Skid Resistance on Dry and Wet Weather Crashes*, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements* 147(3), 04021029 (2021)



Regione Toscana

[25] B.G. Page, L.F. Butas, 1986. Evaluation of friction requirements for California state highways in terms of highway geometrics, Report FHWA/CA/TL-86-01, Office of Transportation Laboratory, California Department of Transport.

[26] H. Al-Masaeid, A. A. Assolie, A. Al-Migdady, Effect of Pavement Conditions on Urban Road Accidents, Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 19, No. 1, 2025, DOI: <https://doi.org/10.14525/JJCE.v19i1.06>