



Zugo



CH

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Curriculum "Ingegneria delle infrastrutture e della mobilità"

Tesi di laurea

**LA SICUREZZA STRADALE, ASPETTI FUNZIONALI DELLE SMART ROADS, I
VEICOLI A GUIDA AUTONOMA E LORO RICADUTE SUL COMPORTAMENTO DI
GUIDA AI FINI DEL MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA STRADALE**

Relatore:

Prof. Stefano Masullo

Candidato:

Giuseppe Minischetti

A.A. 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE	6
Cap.1 La costruzione delle intersezioni stradali Normativa Europea e Normativa Italiana	10
1. 1 La progettazione e la manutenzione delle strade	13
1. 2 Ammaloramenti delle pavimentazioni stradali	16
1. 3 Classificazione degli ammaloramenti delle pavimentazioni flessibili	16
1. 4 Problemi della pavimentazione	18
1. 4. 1 Fessurazione a ragnatela (alligator cracking)	18
1. 4. 2 Fessurazione a blocchi (block cracking)	20
1. 4. 3 Fessurazione di bordo (Edge cracking)	22
1. 4. 4 Fessurazione longitudinale e trasversale (Longitudinal and transverse cracking).	23
1. 4. 5 Fessurazione di richiamo (Joint Reflection Cracking)	25
1. 4. 6 Fessurazione da scorrimento (slippage cracking)	27
1. 4. 7 Risalti e sacche (bumps and sags)	28
1. 4. 8 Ormaiamento (rutting)	29
1. 4. 9 Ondulazioni (corrugations)	31
1. 4. 10 Depressioni (depressions)	32
1. 4. 11 Buche (potholes)	33
1. 4. 12 Rigonfiamenti (swell)	35
1. 4. 13 Scalinamento tra corsia e banchina (lane/shoulder drop-off)	36
1. 4. 14 Spostamento del manto per spinta orizzontale (Shoving)	37
1. 4. 15 Essudazione di bitume (bleeding)	38

1. 4. 16 Levigatura dell'aggregato (polished aggregate)	40
1. 4. 17 Scagliatura della superficie (raveling)	41
1. 4. 18 Rappezzi (patching-utility cut patching)	43
1. 4. 19 Essudazione di acqua e pompaggio (water bleeding and pump)	44
1. 4. 20 Attraversamento binari (railroad crossing)	45
Bibliografia	
46	
1. 5 La regolamentazione del traffico	46
1. 6 L'educazione e la formazione	49
1. 7 La tecnologia di sicurezza	51
1. 8 La prevenzione degli incidenti	52
Cap.2 Le Smart Road	53
2. 1 Il concetto di smart road	56
2. 2 Le funzioni principali di una smart road	71
2. 2.1. Monitoraggio attivo dell'infrastruttura	
73	
2.2.2. Interconnessione tra veicoli e infrastruttura	76
2.2.3 Impatto ambientale e generazione di energia "green"	
79	

2.3 Le tecnologie applicate alle smart roads	86
2.3.1 Tecnologie di comunicazione wireless	
86	
2.3.2 Tecnologie per il monitoraggio infrastrutturale	88
2.3.2.1 Tecnologie di self-aware e di self-adapt	92
2.3.2.2 Monitoraggio del piano viabile	98
2.3.2.3 Monitoraggio delle barriere di sicurezza	98
2.3.2.4 Monitoraggio di ponti e viadotti	
100	
2.3.2.5 Monitoraggio in galleria	101
2.3.2.6 Monitoraggio dei versanti instabili	102
2.3.3 Sistema di monitoraggio del traffico e trasporto merci	103
2.3.4 L'intelligenza artificiale e l'IoT a servizio delle Smart Roads	104
2.4 La sicurezza stradale e le smart roads	107
Bibliografia	109
Cap.3 INTERAZIONE TRA CONDUCENTE E TECNOLOGIA IN-VEHICLE	109
3.1 Background e avvento degli adas	110

3.1.1 Cause di incidente	111
3.1.2 Supporti elettronici alla guida	113
3.1.3 Avvento degli Advanced Driver Assistance Systems	114
3.1.4 Benefici e funzionalità	115
3.1.5 Problematiche associate agli ADAS	116
3.2 Categorie di adas	118
3.2.1 Controllo laterale	118
3.2.2 Controllo longitudinale	120
3.2.3 Retromarcia e parcheggio assistito	122
3.2.4 Sistemi di visibilità migliorata	122
3.2.5 Sistemi di monitoraggio del conducente	123
3.2.6 Sistemi Pre-Crash	124
3.2.7 Sistemi di avviso inerenti le condizioni della pavimentazione stradale	125
3.2.8 Le Smart Roads come estensione della tecnologia ADAS	127
3.3 Gli studi sull'interazione	128
3.3.1 La tecnologia in-vehicle e il workload mentale	129

3.3.2 La distrazione visiva	130
3.3.2.1 Il canale visivo durante la guida e il rischio derivante dalla distrazione	131
3.3.2.2 La distrazione visiva durante la guida tradizionale	132
3.3.2.3 L'impatto dei dispositivi smart sulla distrazione visiva	133
3.3.2.4 L'utilizzo dei movimenti oculari per quantificare la distrazione visiva	134
3.3.2.5 Gli studi effettuati in letteratura	
136	
3.3.3 Cenni sulla distrazione cognitiva	138
3.3.4 Differenze prestazionali durante la distrazione visiva e cognitiva	141
3.4 Interazione e smart roads: i limiti della letteratura	142
Bibliografia	143
Conclusioni	145

Introduzione

La sicurezza stradale è l'insieme di pratiche e politiche volte a ridurre il numero e la gravità degli incidenti stradali. Queste sono composte da vari attori che lavorando sinergicamente fra loro danno vita alla Sicurezza stradale, atta alla riduzione dei morti e feriti sulla strada. In

questa ricerca si è voluto distinguere la SICUREZZA ATTIVA e la SICUREZZA PASSIVA, dove attiva rappresenta tutto ciò che può essere fatto prima dell'incidente quindi in prevenzione, passiva tutto ciò che può aiutare il conducente e i passeggeri dopo l'incidente. I principali aspetti legati alla sicurezza stradale sono stati trattati nei vari capitoli di questa ricerca seguendo questo ordine:

1. **LA COSTRUZIONE DELLE INTERSEZIONI STRADALI NORMATIVA EUROPEA E NORMATIVA ITALIANA:** Capitolo incentrato sulla sicurezza ATTIVA. Questo include la creazione di leggi e regole per governare il traffico, come la velocità massima consentita, i segnali stradali, le norme per i pedoni e la viabilità con l'obiettivo della sicurezza stradale e rendere facile la lettura della segnaletica stradale sia verticale che orizzontale, cercando sempre un equilibrio tra sicurezza e costi delle stesse.
2. **LE SAFETY ROAD:** Capitolo incentrato sulla sicurezza ATTIVA. La progettazione e la manutenzione delle strade: questo include la costruzione di strade sicure, adeguate per la velocità e la capacità del traffico, nonché la manutenzione regolare delle strade per garantire che siano in buone condizioni, con particolare riferimento al conglomerato bituminoso.
3. **INTERAZIONE TRA CONDUCENTE E TECNOLOGIA IN-VEHICLE:** Capitolo incentrato sia sulla sicurezza ATTIVA che PASSIVA. La tecnologia di sicurezza: questo include sicurezze attive e sicurezze passive del veicolo e l'utilizzo di tecnologie come l'assistenza alla frenata di emergenza, il controllo della stabilità, il controllo della trazione e la telematica per aiutare a prevenire gli incidenti.

L'ONU, con la Risoluzione dell'Assemblea Generale del 25/9/2015¹⁷, ha adottato l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile (Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development¹⁸) in cui promuove l'azione nell'area economica, sociale e ambientale dello sviluppo sostenibile nei successivi 15 anni.

Tale importante documento strategico identifica nella sicurezza stradale un prerequisito per garantire una vita sana, promuovere il benessere e rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili ed elenca, tra gli altri, due obiettivi (3.6 e 11.2) relativi a questo importante problema sociale:

- dimezzare, entro il 2020, il numero globale di morti e feriti a causa dagli incidenti stradali
- assicurare a tutti, entro il 2030, l'accesso a sistemi di trasporto sicuri, economici e sostenibili, migliorando la sicurezza stradale, in particolare potenziando i trasporti pubblici, con particolare attenzione alle esigenze di coloro che si trovano in situazioni vulnerabili, donne, bambini, persone con disabilità e persone anziane (obiettivo 11.2).

Tali obiettivi – ribaditi nelle risoluzioni Improving Global road safety del 2016 e 2018 - hanno dato nuovo impulso alla strategia dell'ONU, già definita dalla Risoluzione 64/255

con la quale fu proclamata la Decade of Action for Road Safety for the 2011–2020¹⁹, tuttavia non consentendo il conseguimento dell'ambizioso obiettivo.

Alla luce di ciò, nel settembre 2020, l'Assemblea Generale ha proclamato la Second Decade of Action for Road Safety 2021–2030, con l'obiettivo di ridurre il numero di morti e feriti per incidenti stradali di almeno il 50% tra il 2020 e il 2030 e di raggiungere l'ulteriore obiettivo in materia di sicurezza stradale fissato dall'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile²⁰. Ha inoltre sollecitato gli Stati Membri e la comunità internazionale a intensificare la collaborazione e ha invitato l'Organizzazione Mondiale della Sanità, in collaborazione con la United Nations Road Safety Collaboration (UNRSC) ed altri stakeholders a redigere un Piano di Azione per la seconda decade, quale documento guida, atto a supportare il conseguimento degli obiettivi assunti.

Ai fini del conseguimento degli obiettivi assunti, la strategia definita dall'ONU prevede attività di indirizzo e di coordinamento dei Paesi Membri e si fonda su 5 aree di azione strategiche (pilastri) già indicate nel Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2021:

1. Pilastro 1: Gestione della sicurezza stradale
2. Pilastro 2: Maggiore sicurezza di Strade e Mobilità
3. Pilastro 3: Maggiore sicurezza dei Veicoli
4. Pilastro 4: Maggiore sicurezza degli Utenti della strada
5. Pilastro 5. Gestione della fase post-incidente



Cap.1 La costruzione delle intersezioni stradali

Normativa Europea e Normativa Italiana

La costruzione delle intersezioni stradali. Le norme funzionali e geometriche emanate con il decreto, sono state elaborate sulla base di uno studio approvato dalla Commissione per le norme relative ai materiali stradali e progettazione, costruzione e manutenzione strade del CNR. Il decreto si applica alle nuove intersezioni sulle strade ad uso pubblico; una deroga è prevista per le intersezioni che interessano le autostrade, le strade extraurbane principali e le strade urbane di scorrimento, e del S.I.I.T - Settore infrastrutture territorialmente competente - per le altre strade. Le norme non si applicano alle intersezioni in corso di realizzazione ed a

quelle per le quali, al momento dell'entrata in vigore (23 agosto), sia già stato redatto il progetto definitivo, o il progetto preliminare nel caso di opere inserite nei programmi della legge 443/2001 (Legge Obiettivo). Per i progetti preliminari di opere non inserite nei programmi della legge 443/2001, già approvati, le varianti richieste in applicazione del presente decreto saranno introdotte in corso di stesura del progetto definitivo, senza l'obbligo di rivedere il progetto preliminare.

Norme correlate

Decreto Ministeriale 19/04/2006

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali

Legge dello Stato 21/12/2001 n.443

Legge obiettivo - Delega al Governo in materia di infrastrutture ed insediamenti produttivi strategici ed altri interventi per il rilancio delle attività produttive (versione aggiornata con le modifiche apportate dalla Legge 166/2002)

Decreto Ministeriale 05/11/2001 n.6792

Ministero delle infrastrutture e dei trasporti - Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade (Nesi-Lunardi)

Normativa strade, autostrade e gallerie



Nella presente sezione sono elencati atti e norme relativi all'infrastruttura stradale e autostradale: alcuni riguardano atti emanati dai legislatori europei e nazionali, altri sono documenti di carattere normativo e non solo, emanati dall'Agenzia.

Si fa presente che la raccolta delle normative della presente sezione non ricopre in modo esaustivo l'intero quadro normativo di riferimento, ma riporta soltanto le principali norme riguardanti l'infrastruttura stradale e autostradale.

Legislazione europea

[Direttiva 2019/1936/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2019 che modifica la direttiva 2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.](#)

[Direttiva 2008/68/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 settembre 2008 ,
relativa al trasporto interno di merci pericolose \(Testo rilevante ai fini del SEE\)](#)

[Direttiva CEE 2008/96/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008 ,
sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.](#)

[Direttiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 relativa ai
requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea.](#)

[Convenzione di Vienna sulla segnaletica stradale \(07 settembre 2004\)](#)

Legislazione nazionale

[DECRETO LEGISLATIVO n.213 del 15.11.2021. Attuazione della direttiva \(UE\) 2019/1936
del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2019, che modifica la direttiva
2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.](#)

[DECRETO LEGISLATIVO 15 marzo 2011, n. 35 \(Attuazione della direttiva 2008/96/CE
sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.\) Entrata in vigore del
provvedimento: 23/04/2011](#)

[DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 1° agosto 2011, n. 151
Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla
prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31
maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122.
\(11G0193\)](#)

Norma UNI 2012 UNI EN 1317-5 Barriere di sicurezza stradali – requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli.

[DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 30 luglio 2012, n. 151](#)
[Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 16 dicembre 1992, n. 495, concernente il regolamento di esecuzione e attuazione del Nuovo codice della strada, in materia di strutture, contrassegno e segnaletica per facilitare la mobilità delle persone invalide. \(12G0172\)](#)

Cap.1.1 La progettazione e la manutenzione delle strade

La progettazione e la manutenzione delle strade sono fondamentali per garantire la sicurezza degli utenti della strada. Alcune delle cose che possono essere considerate nella progettazione e manutenzione delle strade sono:

1. Disegno della strada: questo include la scelta della larghezza della carreggiata, delle corsie, dei marciapiedi, delle piste ciclabili e degli spartitraffico.
1. Segnaletica: questo include la posizione e il tipo di segnali stradali, come i segnali di stop, di precedenza e di divieto di svolta, per garantire la sicurezza degli utenti della strada.
2. Barriere di sicurezza: questo include la costruzione di barriere di sicurezza come le barriere di sicurezza delle corsie, le barriere di sicurezza mediane e le barriere di sicurezza per i pedoni, per proteggere gli utenti della strada in caso di incidente.

3. Illuminazione: questo include l'installazione di luci lungo le strade per garantire la visibilità notturna e la sicurezza degli utenti della strada.
4. Drainage: questo include la progettazione e la costruzione di sistemi di drenaggio per rimuovere l'acqua dalle strade durante i temporali e prevenire allagamenti e ghiaccio sulla strada.
5. Manutenzione: questo include la rimozione della neve e del ghiaccio dalle strade durante l'inverno, la riparazione di buche e danni alla strada, e la pulizia delle strade per garantire che siano in buone condizioni per il traffico.

La progettazione e la manutenzione delle strade devono essere effettuate tenendo conto dei vari utenti della strada e delle condizioni climatiche e ambientali.

Il conglomerato bituminoso è uno dei prodotti maggiormente utilizzato per la realizzazione delle pavimentazioni stradali.

La diffusione di queste miscele nella costruzione delle pavimentazioni stradali è dovuta alla grande varietà di prodotti che possono ottenersi operando sulla granulometria dell'inerte, nonché sulla quantità e sulla qualità del bitume, varietà che si traduce nella possibile rispondenza a diverse esigenze (rugosità, regolarità, impermeabilità, possibilità di impiego in piccoli spessori).

Le pavimentazioni HMA (Hot Mix Asphalt) correttamente progettate e mantenute possono fornire molti anni di servizio soddisfacente.

Esistono inoltre oggi dei conglomerati bituminosi drenanti, impiegati negli strati di usura delle pavimentazioni stradali, che sono in grado di assorbire, attraverso l'elevata percentuale di vuoti presenti, l'acqua meteorica, il cui allontanamento dalla superficie avviene per mezzo

dello scorrimento all'interno dello strato. Grazie a tale proprietà essi riducono notevolmente il velo d'acqua tra lo pneumatico e la pavimentazione e garantiscono buoni valori dell'aderenza in qualsiasi condizione atmosferica, eliminando inoltre sostanzialmente i pericolosi fenomeni dell'acquaplaning e della formazione di nuvole di minutissime gocce di acqua sollevate dalle ruote dei veicoli, che ostacolano la visibilità. Le necessarie caratteristiche di resistenza meccanica sono assicurate, nei conglomerati drenanti, attraverso l'impiego di leganti bituminosi modificati. Va inoltre sottolineato che i manti drenanti, oltre a garantire una maggiore sicurezza della circolazione, hanno il pregio di presentare caratteristiche fonoassorbenti.

Fra le tipologie di conglomerati bituminosi esistenti si deve segnalare inoltre la presenza delle miscele riciclate. Infatti, i metodi di riutilizzazione dei materiali costituenti le pavimentazioni si vanno sempre più diffondendo nel campo della manutenzione delle pavimentazioni flessibili, essenzialmente per motivi di economia e di salvaguardia dell'ambiente.

L'uso dell'asfalto, tuttavia, ha molti aspetti negativi. Il più grande è probabilmente l'enorme varietà di danni a cui è soggetto nel corso della sua vita.

Cap.1.2 Ammaloramenti delle pavimentazioni stradali

Si tratta di deterioramenti più o meno superficiali della pavimentazione stradale, che in seguito ad usura meccanica (passaggio di mezzi pesanti, condizioni meteorologiche, ecc.) possono costituire pericoli ed insidie all'incolumità degli utenti; l'analisi delle condizioni delle pavimentazioni della rete stradale svolge un ruolo fondamentale per definire un adeguato programma di manutenzione delle infrastrutture in caso di danneggiamento.

Il degrado di una pavimentazione stradale può essere distinto in:

- funzionale se la struttura è ancora efficiente, ma l'aderenza o la regolarità sono compromesse in modo da rendere la marcia dei veicoli insicura e scomoda;
- strutturale se la pavimentazione presenta rotture dovute ai carichi di traffico ripetuti.

Cap.1.3 Classificazione degli ammaloramenti delle pavimentazioni flessibili

I degradi delle pavimentazioni stradali flessibili possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- Fessurazioni
- Deformazioni superficiali plasto-viscose
- Difetti superficiali
- Altri danni.

1. Fessurazione a ragnatela (alligator cracking)
2. Fessurazione a blocchi (block cracking)
3. Fessurazione di bordo (Edge cracking)
4. Fessurazione longitudinale e trasversale (Longitudinal and transverse cracking)
5. Fessurazione di richiamo (Joint Reflection Cracking)
6. Fessurazione da scorrimento (slippage cracking)
7. Risalti e sacche (bumps and sags)

8. Ormaiamento (rutting)
9. Ondulazioni (corrugations)
10. Depressioni (depressions)
11. Buche (potholes)
12. Rigonfiamenti (swell)
13. Scalinamento tra corsia e banchina (lane/shoulder drop-off)
14. Spostamento del manto per spinta orizzontale(Shoving)
15. Essudazione di bitume (bleeding)
16. Levigatura dell'aggregato (polished aggregate)
17. Scagliatura della superficie (raveling)
18. Rappezzi (patching-utility cut patching)
19. Essudazione di acqua e pompaggio (water bleeding and pump)
20. Attraversamento binari (railroad crossing)

E' comunque bene ricordare che lo stress di una pavimentazione è spesso il risultato di una combinazione di fattori, piuttosto che di una sola causa principale.

Cap.1.4 Problemi della pavimentazione

Analizziamo singolarmente i vari tipi di problemi:

1.4.1. Fessurazione a ragnatela (alligator cracking)



Una serie di fessure interconnesse causate dalla rottura per fatica della superficie sotto ripetuti carichi di traffico. Si originano sul fondo degli strati di conglomerato bituminoso (o della base stabilizzata), dove lo stato tenso-deformativo di trazione indotto dalle sollecitazioni è maggiore. Man mano che il numero e l'entità dei carichi diventano eccessivi, iniziano a formarsi crepe longitudinali (di solito nei percorsi delle ruote). Dopo ripetuti carichi, queste fessure longitudinali si collegano formando pezzi ad angoli acuti a molti lati che si sviluppano in uno schema che ricorda il dorso di un alligatore o di un coccodrillo. Questo ammaloramento è spesso accompagnato dal fenomeno dell'ormaiamento.

A causa delle crepe che si formano, si origina un'infiltrazione di umidità nella base e nel sottofondo, che dopo un po' si traduce in buche e disintegrazione della pavimentazione se non trattata.

Alcune cause possono essere:

Supporto strutturale inadeguato per il carico dato, per via della diminuzione delle caratteristiche di supporto del carico della pavimentazione (probabilmente il motivo più comune è la perdita della base, del sottofondo o del supporto del sottofondo a causa di uno

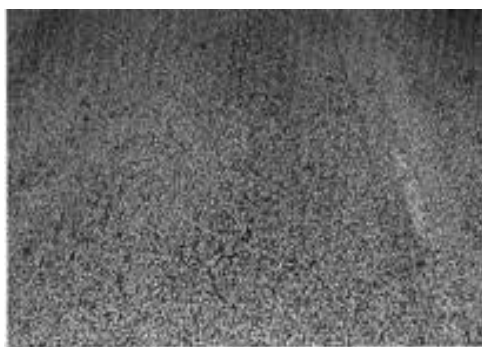
scarso drenaggio), aumento del carico (pavimentazione caricata più pesantemente di quanto previsto nella progettazione), progettazione strutturale inadeguata (la pavimentazione è stata progettata troppo sottile per i carichi previsti), costruzione scadente (compattazione inadeguata)

Grado di severità

Basso – Le fessure sono scarsamente collegate e non sono frastagliate.

Medio – Le fessure sono collegate, leggermente frastagliate e creano un disegno a rete. Le fessure possono essere sigillate; non è evidente lo sgretolamento.

Alto – Le fessure sono ben definite e frastagliate ai bordi; alcuni frammenti possono essere asportati dal traffico. Le fessure possono essere sigillate; lo sgretolamento può essere evidente.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione a ragnatela

1.4.2. Fessurazione a blocchi (block cracking)



Fessure interconnesse che dividono la pavimentazione in pezzi rettangolari. Le dimensioni dei blocchi variano da circa $0,1 \text{ m}^2$ a 10 m^2 . I blocchi più grandi sono generalmente classificati come fessure longitudinali e trasversali. Sono causate dal ritiro del conglomerato bituminoso dovuto alla variazione ciclica di temperatura (di solito per invecchiamento del legante o per scarsa scelta dello stesso in fase di mix design). Indipendenti dai fenomeni di carico, possono presentarsi anche su porzioni non trafficate.

Grado di severità

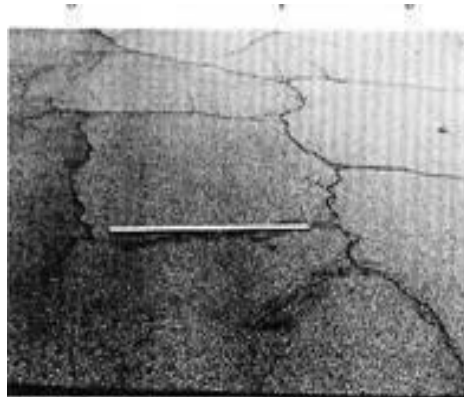
Basso – Le fessure non sigillate hanno un'apertura inferiore a 10 mm; le fessure sigillate sono in buone condizioni.

Medio – L'apertura delle fessure è compresa tra 10 mm e 75 mm; le fessure, di qualunque spessore, sono circondate da altre fessure piccole e disposte disordinatamente.

Alto – Le fessure non sigillate hanno un'apertura maggiore di 75 mm; le fessure sigillate sono circondate da altre fessure di media o alta severità disposte disordinatamente; una fessura di qualunque spessore si trova a poca distanza da una fessura di seria entità.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione a blocchi



1.4.3. Fessurazione di bordo (Edge cracking)



Le fessure di bordo, di forma abbastanza ricurva, interessano la striscia esterna di pavimentazione larga 60 cm adiacente alla banchina. Queste sono causate da fenomeni di gelo nel sottofondo o nella fondazione vicino al bordo della pavimentazione; sono accelerate dal carico del traffico.

Grado di severità

Basso – Non è presente disgregazione o sfrangiamento.

Medio – Le fessure presentano perdita di materiale su non oltre il 10% della lunghezza di pavimentazione interessata dal fenomeno.

Alto – Le fessure presentano perdita di materiale su oltre il 10% della lunghezza di pavimentazione esaminata.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione di bordo

1.4.4. Fessurazione longitudinale e trasversale (Longitudinal and transverse cracking)



Le fessure longitudinali sono crepe parallele alla linea centrale della pavimentazione o alla direzione di posa dello strato superficiale; solitamente un tipo di fessurazione da fatica.

La formazione di queste fessure è dovuta generalmente a cattiva costruzione o posizionamento del giunto (i giunti sono aree meno dense di una pavimentazione, e dovrebbero essere allocati al di fuori del percorso delle ruote, in modo che vengano caricati

solo raramente), crepe riflesse da uno strato sottostante, fatica, escursioni termiche giornaliere.

Le fessure trasversali sono crepe perpendicolari alla linea centrale della pavimentazione o alla direzione di posa; sono solitamente fratture di tipo termico.

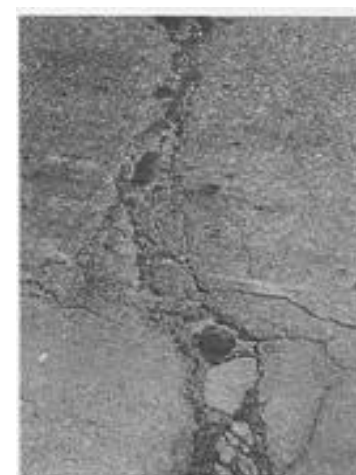
Le cause del fenomeno sono il ritiro della superficie in conglomerato bituminoso dovuto alle basse temperature o all'indurimento del legante bituminoso, oppure crepe riflesse causate da crepe sotto lo strato superficiale

Grado di severità

Basso – Lo spessore delle fessure non sigillate è minore di 10 mm e le fessure sigillate sono in buone condizioni, qualunque sia il loro spessore.

Medio – Le fessure non sigillate hanno uno spessore compreso tra 10 mm e 75 mm e le fessure, di qualunque spessore, sono circondate da altre fessure piccole e disposte disordinatamente.

Alto – Le fessure sono circondate da fessurazione a ragnatela di severità media o alta e le fessure non sigillate hanno uno spessore superiore a 75 mm.



Severità bassa

Severità media

Severità alta

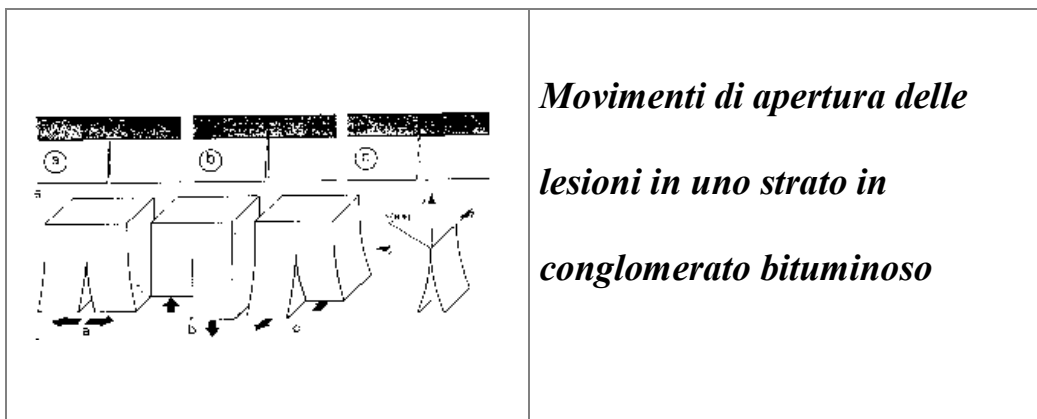
Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione di bordo

1.4.5. Fessurazione di richiamo (Joint Reflection Cracking):



Questa tipologia di danno è presente solo nelle pavimentazioni composte di lastre in calcestruzzo ricoperte in conglomerato bituminoso; le crepe si verificano direttamente sopra i giunti rigidi della pavimentazione sottostante e sono causate dal movimento della soletta rigida della pavimentazione sotto la superficie flessibile a causa di variazioni termiche e di umidità. Non sono generate dai carichi di traffico, ma il caricamento può accelerare il deterioramento.

Poiché i carichi di traffico inducono sollecitazioni di taglio in direzione verticale, essi influenzano la diffusione orizzontale delle lesioni e possono provocare il distacco degli strati bitumati da quello cementizio.



*Movimenti di apertura delle
lesioni in uno strato in
conglomerato bituminoso*

Grado di severità

Basso – Lo spessore delle fessure non sigillate è minore di 10 mm e le fessure sigillate sono in buone condizioni, qualunque sia il loro spessore.

Medio – Le fessure non sigillate hanno uno spessore compreso tra 10 mm e 75 mm e le fessure, di qualunque spessore, sono circondate da altre fessure piccole e disposte disordinatamente.

Alto – Le fessure sono circondate da fessurazione a ragnatela di severità media o alta e le fessure non sigillate hanno uno spessore superiore a 75 mm.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione di richiamo

1.4.6. Fessurazione da scorrimento (slippage cracking)



Le fessure da scorrimento, a forma di mezzaluna, generalmente con le due estremità rivolte nella direzione del traffico, sono causate dalla frenata o dalla rotazione delle ruote, che provocano lo scivolamento e la deformazione della superficie della pavimentazione. Lo scivolamento e la deformazione risultanti appaiono in genere a causa di una miscela superficiale a bassa resistenza o di uno scarso legame tra lo strato superficiale e il successivo strato sottostante nella struttura della pavimentazione. In genere queste lesioni si manifestano in curva, in salita, nelle intersezioni.

Grado di severità

Basso – Lo spessore della fessura è inferiore a 10 mm.

Medio – Lo spessore è compreso tra 10 mm e 38 mm; l'area limitrofa è divisa in tanti pezzi di piccole dimensioni.

Alto – Lo spessore è maggiore di 38 mm; l'area limitrofa è divisa in frammenti facilmente rimovibili.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

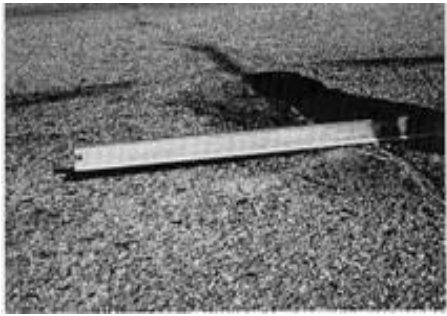
Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione da scorrimento

1.4.7. Risalti e sacche (bumps and sags)

I risalti sono piccoli e localizzati dossi della superficie; si generano in presenza di instabilità della pavimentazione, lenti di ghiaccio, infiltrazione e crescita di materiale organico all'interno di fessure in combinazione con il carico dovuto al traffico. Le sacche sono piccoli, improvvisi avvallamenti della superficie.

Grado di severità

Il grado di severità si distingue in basso, medio, alto in funzione della perdita di qualità di marcia che si registra su di essi. Tale perdita di qualità viene riferita ad una soglia stabilita mediante prove di percorrenza della strada.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Risalti e sacche

1.4.8. Ormaiamento (rutting)



Le ormaie sono avvallamenti superficiali nella carreggiata. Si formano lungo la traiettoria percorsa dalle ruote dei veicoli, e sono particolarmente evidenti quando si riempiono d'acqua piovana. Esistono due tipi fondamentali di solchi: misti e sottostanti. Il solco misto si verifica quando il sottofondo non presenta solchi ma la superficie della pavimentazione si, a causa di problemi di compattazione o progettazione del misto. L'ormaiamento del sottofondo si verifica quando il sottofondo presenta depressioni della carreggiata dovute al carico e ad una

struttura della pavimentazione inadeguata. In questo caso la pavimentazione si assesta nei solchi del sottofondo provocando avvallamenti superficiali della carreggiata.

In entrambi i casi, la pavimentazione intorno alle ormaie si può sollevare.

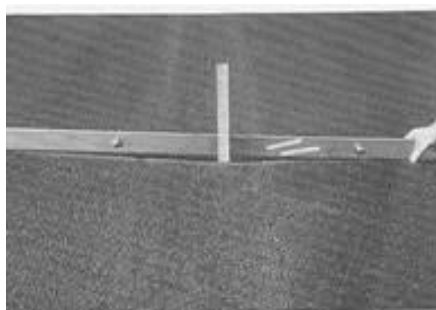
I solchi, pieni d'acqua a seguito di piogge, possono causare l'aquaplaning del veicolo, oppure possono essere pericolosi perché tendono a far sterzare il veicolo quando li attraversa.

Grado di severità

Basso – La profondità dell'ormiaia è inferiore a 13 mm.

Medio – La profondità dell'ormiaia è compresa tra 13 mm e 25 mm.

Alto – La profondità dell'ormiaia è maggiore di 25 mm.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Ormaiamento

1.4.9. Ondulazioni (corrugations)



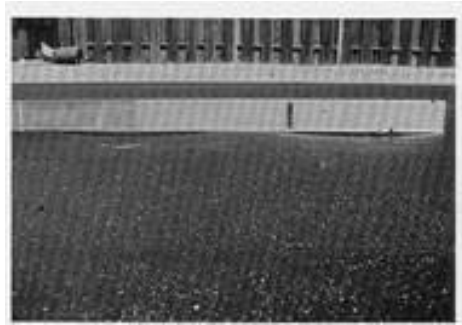
Le ondulazioni sono una successione di avvallamenti e di innalzamenti (increspature) lungo la superficie stradale ad intervalli regolari, di solito inferiori a 3 m. Le distorsioni sono perpendicolari alla direzione del traffico. Sono causate dall'azione del traffico e di solito si verificano nei punti in cui il traffico inizia e si ferma, spesso in combinazione con scarsa progettazione della miscela, mancanza di aerazione delle emulsioni di asfalto liquido o eccessiva umidità nel sottofondo.

Grado di severità

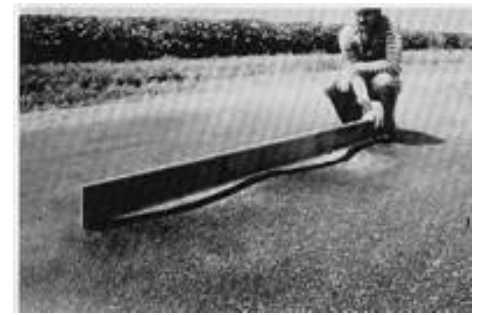
Il grado di severità si distingue in basso, medio, alto in funzione della perdita di qualità di marcia.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Ondulazioni

1.4.10. Depressioni (depressions)



Le depressioni sono porzioni di pavimentazioni localizzate a quote leggermente inferiori rispetto a quelle circostanti. Le depressioni risultano evidenti dopo una pioggia, quando si riempiono d'acqua. Possono essere causate da cedimenti del sottofondo dovuto alla costruzione di manufatti nelle vicinanze o da una compattazione errata in fase di costruzione.

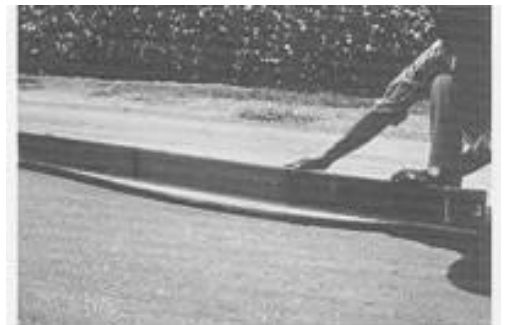
Un problema derivante da questo fenomeno risulta essere quello degli avvallamenti che, pieni d'acqua, possono causare l'aquaplaning del veicolo.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Depressioni

Grado di severità

Massima profondità delle depressioni:

Basso – compresa tra 13 mm e 25 mm.

Medio – compresa tra 25 mm e 50 mm.

Alto – maggiore di 50 mm.

1.4.11. Buche (potholes)



Le buche sono uno dei tipi più noti di danni; si presentano come piccole depressioni, a forma di scodella, di diametro inferiore a 1 m, presenti sulla superficie stradale, che penetrano fino allo strato di base. I bordi sono solitamente netti e spigolosi ed i lati in prossimità della parte

superiore sono verticali. Il loro scavo è accelerato dalla presenza d'acqua che può ristagnare al loro interno. In genere, le buche sono il risultato finale della rottura per fatica, e si possono formare quando, a causa del traffico veicolare, vengono asportate piccole porzioni di pavimentazione. La pavimentazione continua a rovinarsi a causa dell'insufficiente protezione del manto stradale, o a causa della presenza di punti deboli negli strati sottostanti, o a causa di un eccessivo progredire di fessure a ragnatela.

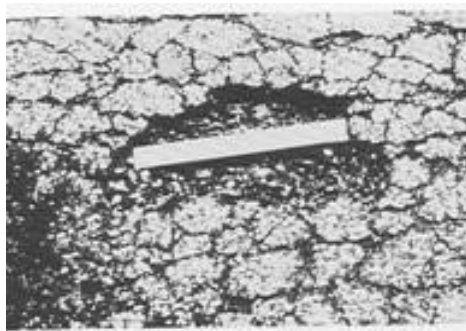
Possono derivare gravi danni al veicolo in caso di attraversamento di buche a velocità elevate.

Grado di severità

La definizione dei livelli di severità considera il diametro e la profondità della buca, come riportato nella tabella seguente.

DIAMETRO DELLE BUCHE

Massima profondità della buca	102mm -203 mm	203 mm - 457 mm	457 mm - 762 mm
12,7 mm - 25,4 mm	basso	basso	Medio
25,4 mm - 50,8 mm	basso	medio	Alto
> 50,8 mm	medio	alto	Alto



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Buche

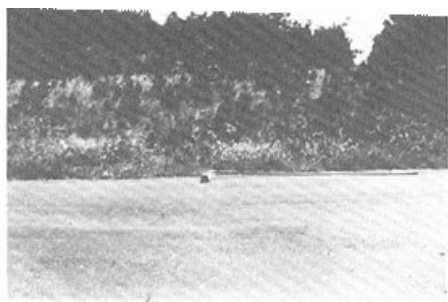
1.4.12. Rigonfiamenti (swell)



I rigonfiamenti sono caratterizzati da un graduale innalzamento della superficie stradale che si prolunga per più di 3 m. È causato dall'azione del gelo nel sottofondo; spesso si presenta con formazione di fessure da scorrimento.

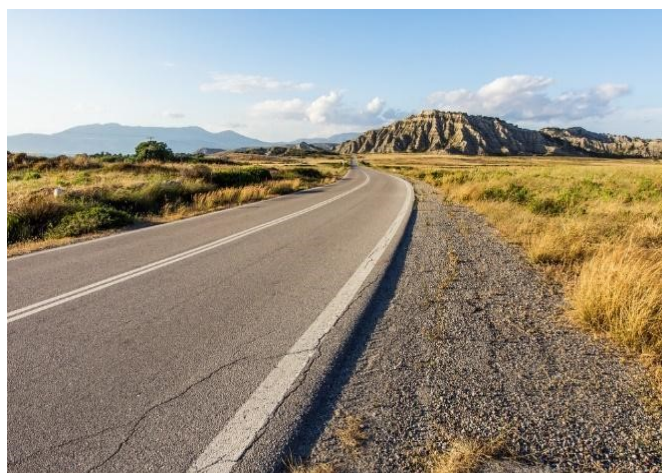
Grado di severità

Il grado di severità si distingue in basso, medio, alto in funzione della perdita di qualità di marcia. Per quanto riguarda il livello inferiore, non sempre è facilmente riconoscibile, può essere riscontrato percorrendo il tratto interessato alla velocità limite.



*Pavimentazioni stradali flessibili –
Rigonfiamenti*

1.4.13. Scalinamento tra corsia e banchina (lane/shoulder drop-off)



Discrepanza di quota tra la superficie percorsa dai veicoli e la linea esterna della banchina; a volte si può osservare anche una differenza tra corsie dovuta ad irregolarità durante la messa in opera del materiale superficiale. Principalmente il fenomeno è causato però dall'erosione della banchina o dal suo assestamento.

Grado di severità

Basso – Il dislivello è compreso tra 25 mm e 50 mm.

Medio – La differenza di quota è compresa tra 50 mm e 100 mm.

Alto – Il dislivello è maggiore di 100 mm.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Scalinamento tra corsia e banchina

1.4.14. Spostamento del manto per spinta orizzontale (Shoving)



Questo ammaloramento è uno spostamento longitudinale permanente in un'area circoscritta del manto e generalmente si verifica nelle aree in cui il conglomerato bituminoso si appoggia a un oggetto rigido; il traffico, spingendo contro la pavimentazione, produce un'onda corta e brusca nel manto. Tale ammaloramento generalmente si trova solo in pavimentazioni con miscele di conglomerato bituminoso molto liquido (emulsioni).

Grado di severità

Il grado di severità si distingue in basso, medio, alto in funzione della perdita di qualità di marcia.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Spostamento del manto per spinta orizzontale

1.4.15. Essudazione di bitume (bleeding)



In caso di manti con eccessivo contenuto di bitume, può formarsi una superficie riflettente lucida, simile al vetro, che può diventare appiccicosa quando è asciutta e scivolosa quando è

bagnata. Il fenomeno è causato dal surriscaldamento della superficie per irraggiamento: lo stato termico aumenta le caratteristiche viscosi del materiale, favorendo dislocazioni interne.

Nelle miscele con eccessivo contenuto di bitume o con scarsa presenza di vuoti, il bitume riempie i vuoti durante il periodo caldo espandendosi poi in superficie: Poiché il fenomeno non è reversibile durante la stagione fredda o i periodi di basso carico, il legante per asfalto si accumulerà sulla superficie della pavimentazione nel tempo. Possibili cause sono: eccessivo legante per asfalto (a causa di una cattiva progettazione della miscela o di problemi di produzione), applicazione eccessiva di legante bituminoso durante in opera, basso contenuto di vuoti d'aria.

Grado di severità

Basso – In un anno, il fenomeno si manifesta solo durante pochi giorni.

Medio – In un anno, il fenomeno si manifesta durante poche settimane: la superficie stradale aderisce ai pneumatici e alle scarpe.

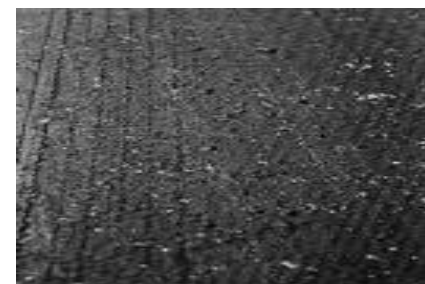
Alto – Porzioni notevoli di superficie aderiscono ai pneumatici e alle scarpe durante le settimane più calde dell'anno.



Severità bassa



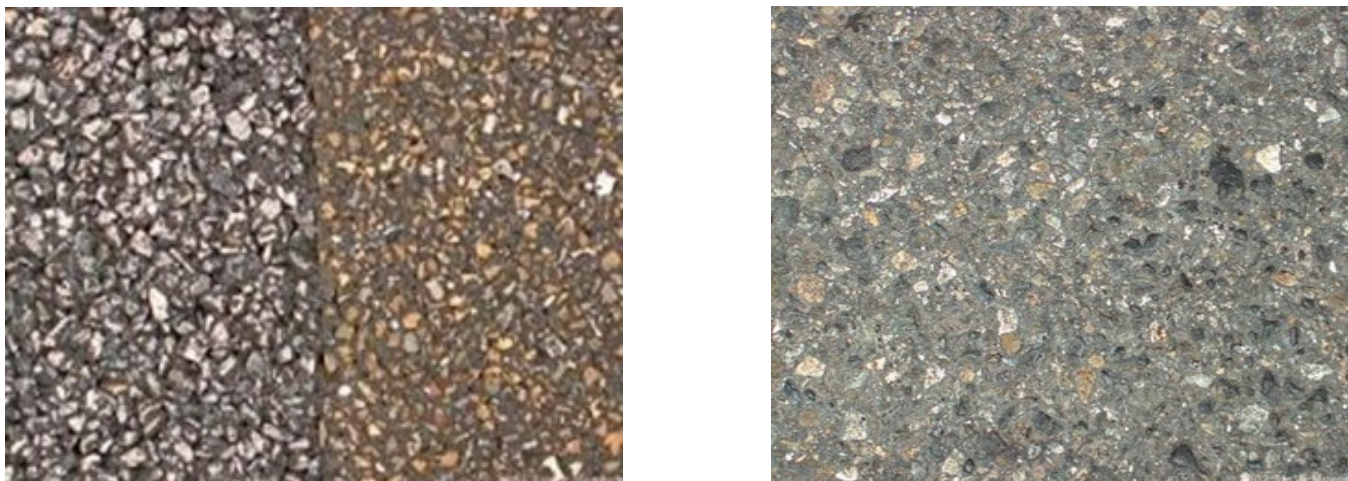
Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Essudazione di bitume

1.4.16. Levigatura dell'aggregato (polished aggregate)

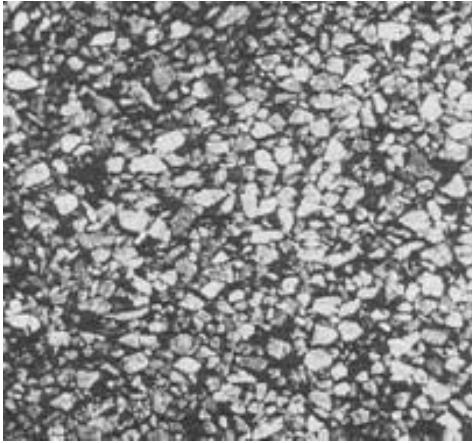


Aree di pavimentazione in cui la porzione di aggregato che si estende al di sopra del legante bituminoso è molto piccola o non sono presenti particelle di aggregato ruvide o spigolose; causano diminuzione della resistenza allo slittamento.

Il fenomeno è causato dalla ripetizione dei carichi di traffico che rendono l'aggregato liscio in superficie, diminuendo l'aderenza con gli pneumatici; generalmente, quando una pavimentazione invecchia, le particelle spigolose sporgenti diventano levigate (l'effetto è più rapido se l'aggregato è suscettibile all'abrasione).

Grado di severità

Nessuno.



*Pavimentazioni stradali flessibili –
levigatura dell'aggregato*

1.4.17. Scagliatura della superficie (raveling)



La progressiva disintegrazione dello strato superficiale dovuto all'usura. Il fenomeno, che indica una scarsa qualità della miscela e un indurimento della stessa, può presentarsi con perdita dei fini come con perdita di inerti grossolani, che vengono poi allontanati dal traffico.

La perdita di legame tra le particelle di aggregato e il legante bituminoso può avvenire per invecchiamento del legante (ossidazione del legante bituminoso), per compattazione inadeguata durante la costruzione, per polvere sulle particelle di aggregato (il legante di

asfalto si lega con la polvere piuttosto che con l'aggregato), per spostamento meccanico dovuto a determinati tipi di traffico (pneumatici chiodati, spazzaneve o veicoli cingolati).

Tra le criticità causate da questo problema abbiamo: detriti sciolti sul marciapiede, asperità, accumulo di acqua con conseguente aquaplaning del veicolo, perdita di resistenza allo slittamento.

A volte invece la perdita di legame tra gli aggregati e il legante bituminoso inizia nella parte inferiore dello strato bituminoso e progredisce verso l'alto; in questo caso si parla di “stripping”, e le problematiche legate a questo fenomeno sono connesse ad una diminuzione del supporto strutturale, ed alla formazione di solchi, ondulazioni, sfilacciate o fessurazioni.

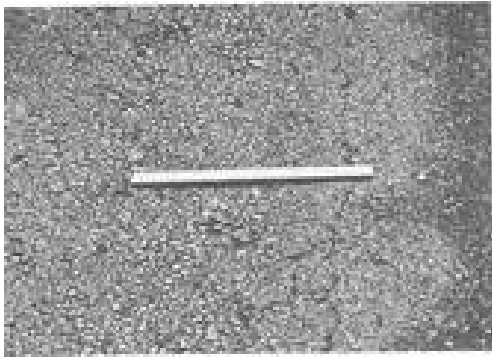
Lo stripping è molto difficile da riconoscere perché si manifesta sulla superficie come altre forme di deterioramento, ed è necessario prelevare un nucleo di pavimentazione per identificare il problema.

Grado *di* *severità*

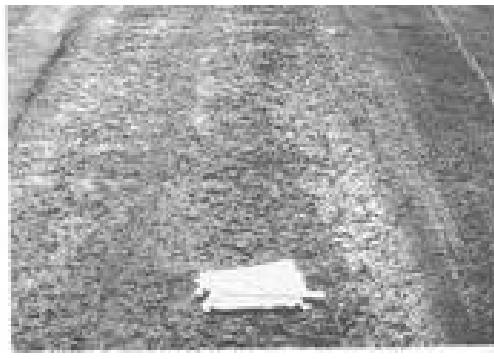
Basso – Inizia il processo di asportazione dell'aggregato; in alcune zone la superficie diviene ruvida.

Medio – La tessitura superficiale è moderatamente scabra e butterata.

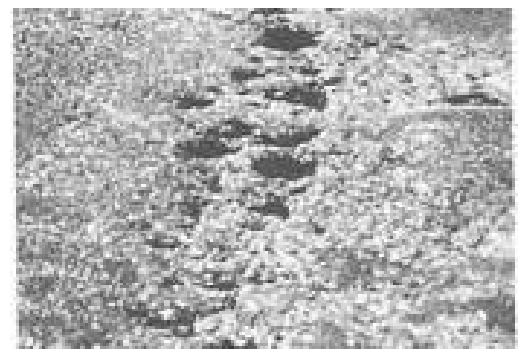
Alto – Notevoli quantità di inerte sono state asportate; le zone interessate dal fenomeno hanno diametri inferiori a 10 mm e profondità inferiori a 13 mm; le superfici più ampie di quelle menzionate sono classificate come buche.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Scagliatura della superficie

1.4.18. Rappezzi (patching-utility cut patching)



Un'area di pavimentazione che è stata sostituita con nuovo materiale per riparare la pavimentazione esistente. Un rappezzo è considerato un difetto, perché la superficie rinnovata e quella ad essa adiacente non recuperano le caratteristiche tecnico-funzionali originali.

Cause di rattoppo sono il progressivo deterioramento localizzato della pavimentazione che è stato rimosso e rattoppato o tagli di utilità.

Grado di severità

Basso – Il rappezzo è in buone condizioni, presenta un basso livello di ammaloramento.

Medio – Il rappezzo è moderatamente deteriorato.

Alto – Il rappezzo è deteriorato, necessita di sostituzione immediata; sul rappezzo è stato posto ulteriore materiale differente.



Severità bassa



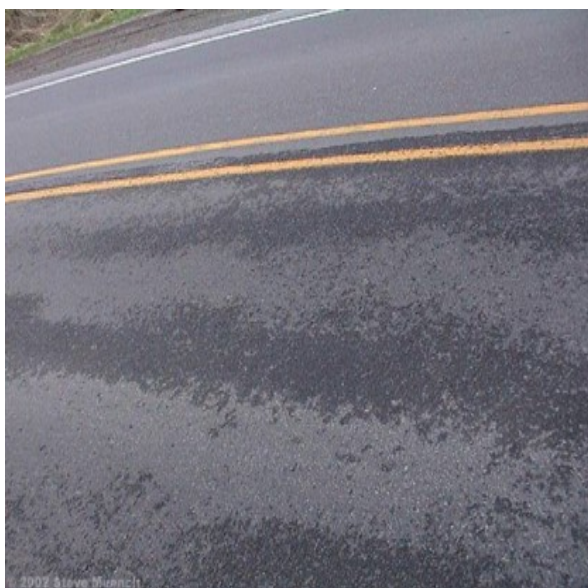
Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Rappezzi

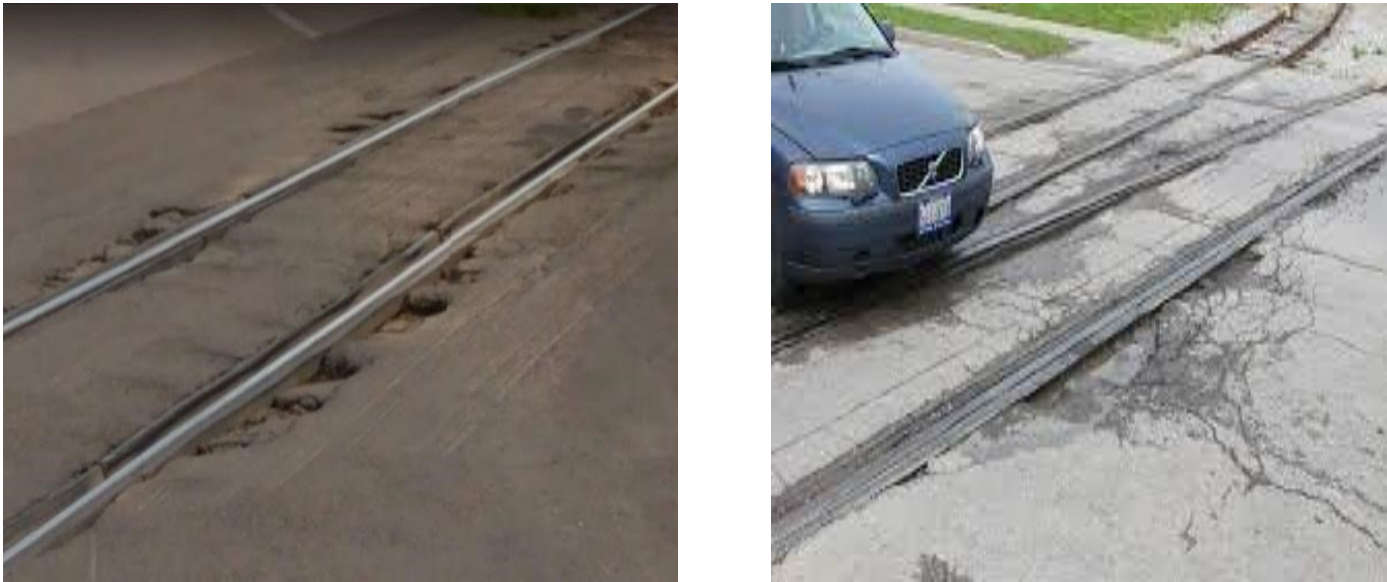
1.4.19. Essudazione di acqua e pompaggio (water bleeding and pump)



Si verifica quando l'acqua fuoriesce da giunti o fessure o attraverso uno strato di conglomerato bituminoso eccessivamente poroso. Acqua e materiale possono venire espulsi (pompaggio) dagli strati sottostanti attraverso le fessure o dai lati dello strato bituminoso per via dei carichi in movimento. Questo fenomeno evidenzia un'elevata porosità della pavimentazione e crea una diminuzione del supporto strutturale (in caso di pompaggio).

Cause possono essere: compattazione inadeguata durante la costruzione o cattiva progettazione della miscela, presenza di un'alta falda freatica, cattivo drenaggio.

1.4.20. Attraversamento binari (railroad crossing)



Si possono notare delle irregolarità superficiali nella striscia interna o esterna ai binari: ogni tipo di danno presente è considerato come parte dell'attraversamento.

Grado di severità

Il grado di severità si distingue in basso, medio, alto in funzione della perdita di qualità di marcia.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Attraversamento binari

Bibliografia

- M. Y. Shahin, *“Pavement Management For Airports, Roads, And Parking Lots“*, Kluwer Academic Publishers
- ASTM D6433-03 *“Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys”*
- FAA - AC 150/5380-6 *“Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements”*, 12/3/82.
- *“Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.”* National Asphalt Paving Association Education Foundation. Lanham, MD.

Cap.1.5 La regolamentazione del traffico

Gli aspetti salienti della regolamentazione del traffico, ai fini della sicurezza stradale, hanno la loro matrice strutturale nella legislazione specifica e nella governance del traffico.

Nella regolamentazione del traffico riveste un rilievo fondamentale l'analisi dei seguenti aspetti:

1. Limiti di velocità: La velocità massima consentita su strade e autostrade è regolamentata per garantire la sicurezza degli utenti della strada. La velocità massima può variare in base al tipo di strada e alle condizioni meteorologiche.
2. Segnali stradali: I segnali stradali sono utilizzati per governare il traffico e indicano agli utenti della strada i limiti di velocità, le direzioni, le regole e le precauzioni da prendere.

3. Norme per i pedoni: Le norme per i pedoni sono state create per garantire la sicurezza dei pedoni sulla strada e possono includere le norme per attraversare la strada, i marciapiedi e i passaggi pedonali.
4. Uso della cintura di sicurezza: L'uso della cintura di sicurezza è obbligatorio in molti paesi per tutti gli occupanti di un veicolo in movimento per garantire la sicurezza in caso di incidente.
5. Uso degli airbag: Gli airbag sono dispositivi di sicurezza progettati per proteggere gli occupanti di un veicolo in caso di incidente. L'uso degli airbag è obbligatorio in molti paesi.
6. Leggi sull'uso dei dispositivi elettronici: molte leggi vietano l'uso di dispositivi elettronici come telefoni cellulari e tablet mentre si guida per evitare distrazioni e aumentare il rischio di incidenti.
7. La patente: per la guida è necessario avere una patente valida, che può essere ottenuta solo dopo aver superato un esame teorico e pratico e aver rispettato determinate condizioni.

La circolazione stradale che disciplina la circolazione su strada dei veicoli, dei pedoni e degli animali. Le principali fonti sono:

l' Art. 16 della Costituzione Italiana: "Ogni cittadino può circolare e soggiornare liberamente in qualsiasi parte del territorio nazionale, salvo le limitazioni che la legge stabilisce in generale per motivi di sanità o di sicurezza". Pertanto in materia di circolazione vige il principio della riserva di legge: qualsiasi limitazione alla libertà di

circolazione può provenire solo dalla legislazione ordinaria e non da fonti di rango inferiore, a meno che non sussistano motivi di sanità o di sicurezza

il c.d. “Nuovo Codice della Strada”, approvato con D.Lgs. 285/92 ed entrato in vigore il 1° gennaio 1993. Trattandosi di un Decreto Legislativo, emanato dal Governo sulla base di una legge delega approvata dal Parlamento, le norme contenute in esso hanno valore e forza di legge. Si suddivide in sette titoli distinti:

TITOLO I Disposizioni generali

TITOLO II Della costruzione e tutela delle strade

TITOLO III Dei veicoli

TITOLO IV Guida dei veicoli e conduzione degli animali

TITOLO V Norme di comportamento

TITOLO VI Degli illeciti previsti dal C.d.s. e delle relative sanzioni

TITOLO VII Disposizioni finali e transitorie

il D.P.R. 16 dicembre 1992, n. 495 ossia il “Regolamento di esecuzione e di attuazione del Codice della Strada”, inizialmente composto di 408 articoli destinati ad integrare, ovvero a specificare la normativa contenuta nel Codice della Strada

Nel corso degli anni numerose sono state le leggi che, nell’ottica della sicurezza stradale, hanno apportato modifiche alla normativa originaria, introducendo nuove disposizioni. Faremo accenno solo alle riforme più rilevanti.

D.Lgs. n. 9/2002 tra le novità più importanti introdotte da questa riforma è l’introduzione della c.d. “patente a punti” prevista dall’art. 126 bis C.D.S. I punti sono attribuiti all’atto del rilascio della patente e decurtati a seconda della gravità della violazione. Ulteriore innovazione apportata da tale Decreto è rappresentata dall’introduzione del

certificato di idoneità alla guida da conseguire per la guida di ciclomotori da parte di minori che abbiano compiuto i 14 anni d'età

L. n. 94/15, il c.d. Pacchetto Sicurezza. Tra le novità introdotte sono da evidenziare quelle relative all'inasprimento di un terzo di determinate sanzioni pecuniarie previste per una serie di violazioni di norme comportamentali, laddove commesse dopo le ore 22 e prima delle ore 7, nonché l'inasprimento delle sanzioni a carico di chi guida sotto l'effetto di sostanze alcoliche o di sostanze stupefacenti (artt. 186 e 187 C.d.S)

L. n. 120/2010. Tra le modifiche più rilevanti sono da segnalare quelle relative alla disciplina della patente a punti (introduzione dell'obbligo di sottoporsi nuovamente all'esame di idoneità tecnica e della riattribuzione dei punti attraverso corsi di aggiornamento), nuova disciplina per i veicoli confiscati (art. 214 bis C.d.S) ed in materia di contestazione delle violazioni, della redazione dei verbali e notificazione degli stessi (art. 200 e 201 C.d.S.), introduzione del pagamento rateale delle sanzioni pecuniarie (art. 202 C.d.S.)

L. n. 41/2016 introduce nell'ordinamento le fattispecie del reato di omicidio stradale (art. 589 bis c.p.) e quello di lesioni personali gravi o gravissime (art. 590 c.p.), intervenendo sulle sanzioni amministrative accessorie collegate alle due fattispecie (artt. 222 e 223 C.d.S.)

Cap.1.6 L'educazione e la formazione

L'educazione e la formazione sono elementi fondamentali per la sicurezza stradale. L'educazione degli utenti della strada, come i conducenti, i pedoni e i ciclisti, può aiutare a

prevenire incidenti e lesioni. Ciò può essere fatto attraverso campagne di sensibilizzazione, programmi di formazione e istruzione, nonché attraverso la promozione di comportamenti sicuri sulla strada.

Guida e Vai con Sicurezza” è un’iniziativa nata il 22 gennaio 2022 che mette al primo posto la sicurezza stradale e la vita. Gli incidenti stradali sono una tematica molto importante da non mettere in secondo piano e trascurare, per questo motivo abbiamo deciso di agire.

Basta distrazioni! Basta incidenti stradali!

Guida e Vai e le autoscuole italiane che tengono davvero alla sicurezza stradale si sono messe insieme per dare vita a questo enorme progetto, mai visto prima, in nessuna parte del mondo.

L’obiettivo è quello di ridurre realmente gli incidenti stradali e i morti sulla strada. Nascono così i corsi di “Guida e Vai con Sicurezza” che insegnano agli allievi come fronteggiare gli imprevisti e come gestire le situazioni critiche che potrebbero verificarsi durante la guida.

Grazie ai nostri corsi, i nostri allievi saranno in grado di affrontare circostanze di pericolo nel miglior modo possibile, diminuendo drasticamente le probabilità di incidente.

Attualmente anche l’intelligenza artificiale sta sbarcando tra le vecchie mura delle scuole di guida. QUIZ PATENTE di Guida e Vai con sede a Milano, è l’unica società che sta cercando di andare in contro alle esigenze del discente. Parla la lingua dei giovani ragazzi, usa lo strumento più adatto a loro, un insegnante virtuale che spiega ai ragazzi tutto il codice della strada e si prende cura di fargli fare i test, registrandone l’insufficienza e rispiegando la lezione.

Per quanto riguarda la formazione degli operatori del traffico, come gli agenti della polizia stradale, è importante che ricevano una formazione adeguata per essere in grado di gestire efficacemente la sicurezza stradale e garantire che le leggi e i regolamenti siano rispettati. La formazione dovrebbe includere informazioni sulla legislazione stradale, la gestione del traffico e la prevenzione degli incidenti.

In generale, l'educazione e la formazione sono fondamentali per promuovere una cultura della sicurezza stradale e per ridurre il numero di incidenti e lesioni sulla strada.

Cap.1.7 La tecnologia di sicurezza

La tecnologia di sicurezza è un elemento importante per la prevenzione degli incidenti stradali. Nei veicoli sono adottate sicurezze attive e sicurezze passive. Le sicurezze attive possono essere meccaniche ed elettroniche, queste a prescindere se l'una o altre intervengono prima dell'incidente stradale, mentre le sicurezze passive intervengono dopo l'incidente stradale. L'utilizzo di tecnologie avanzate come l'assistenza alla frenata di emergenza (AEB), il controllo della stabilità (ESP), il controllo della trazione (TCS) e la telematica può aiutare a ridurre il numero di incidenti e lesioni sulla strada.

L'AEB è un sistema che utilizza sensori per rilevare la presenza di ostacoli sulla strada e, se necessario, frenare automaticamente per evitare un incidente. Il controllo della stabilità (ESP) aiuta a mantenere il veicolo in traiettoria in caso di perdita di controllo, mentre il controllo della trazione (TCS) aiuta a migliorare la stabilità del veicolo in caso di condizioni di guida difficili.

La telematica, invece, consiste in una serie di tecnologie come GPS, telecamere e sensori che consentono di raccogliere e trasmettere dati sullo stato del veicolo e del suo ambiente

circostante. Questi dati possono essere utilizzati per migliorare la sicurezza stradale attraverso l'analisi dei dati, la previsione dei rischi e la progettazione di soluzioni.

In generale, l'utilizzo di tecnologie avanzate di sicurezza può aiutare a prevenire gli incidenti stradali e a ridurre il numero di lesioni e morti sulla strada.

Cap.1.8 La prevenzione degli incidenti

La prevenzione degli incidenti è un aspetto cruciale della sicurezza stradale. Ci sono diverse strategie e programmi che possono essere utilizzati per prevenire gli incidenti stradali, tra cui:

- Campagne di sensibilizzazione sulla sicurezza stradale: queste campagne mirano a educare gli utenti della strada sui rischi e sui comportamenti sicuri sulla strada. Possono comprendere messaggi televisivi, radiofonici, sui social media e su cartelloni pubblicitari.
- Programmi di prevenzione degli incidenti: questi programmi possono includere iniziative mirate a prevenire comportamenti pericolosi come l'uso di droghe e alcol alla guida. Possono anche comprendere programmi di formazione e istruzione per gli utenti della strada, come i conducenti giovani.
- Promozione di comportamenti sicuri sulla strada: questo può comprendere la promozione dell'uso della cintura di sicurezza, dei caschi per i motociclisti, dell'utilizzo di seggiolini per bambini e del rispetto delle regole del traffico.
- Interventi infrastrutturali: è possibile anche intervenire sull'infrastruttura stradale per rendere le strade più sicure. Ad esempio, attraverso la creazione di zone a velocità ridotta, l'installazione di barriere di sicurezza, la creazione di piste ciclabili e la segnalazione stradale.

- Collaborazione tra le diverse parti interessate: è importante che ci sia una collaborazione tra le diverse parti interessate, come le autorità locali, le organizzazioni dei conducenti, le associazioni dei pedoni e le organizzazioni dei ciclisti, per promuovere una cultura della sicurezza stradale.

In generale, una combinazione di queste strategie e programmi può aiutare a prevenire gli incidenti stradali e a ridurre il numero di lesioni e morti sulla strada.

Cap.2 Le Smart Road

La percezione generale delle infrastrutture sta subendo un processo “degenerativo”. Nello specifico, vi è una crescente associazione delle strade con i soli attributi negativi, quali: inquinamento, rumore, elevato tasso di incidentalità. La sfida sta nell’identificare gli attributi positivi delle strade intelligenti, o Smart Roads, per ridefinire il concetto stesso di strada. Questo concetto è supportato dalle nuove tecnologie ITS (Intelligent Transportation System) e da soluzioni road-based che rendono il trasporto di persone e merci più interessante, sicuro, confortevole e affidabile. Questi nuovi sviluppi tecnologici forniscono, inoltre, miglioramenti dal punto di vista ambientale, economico e sostenibile, non soffermandosi unicamente al progetto e alla costruzione di nuove infrastrutture, ma contribuendo, allo stesso tempo, al miglioramento del patrimonio esistente.

Il rilancio del settore delle infrastrutture di trasporto attraverso la trasformazione digitale, o digital transformation, rappresenta un fattore idoneo alla crescita sostenibile, intelligente ed inclusiva del Paese, in grado di generare infrastrutture snelle, di qualità, economiche, con elevati standard di sicurezza, maggiormente utilizzate e fruite, capaci di originare dati e servizi per una migliore esperienza di viaggio per gli utenti, per facilitare il trasporto delle

merci e contribuire alla creazione di un ecosistema tecnologico favorevole per le imprese. La digital transformation rappresenta un'enorme occasione per valorizzare l'ingente patrimonio infrastrutturale esistente attraverso interventi di upgrading tecnologico il cui costo ed i cui tempi di realizzazione sono molto più bassi rispetto agli interventi tradizionali sulle infrastrutture fisiche.

Negli ultimi anni, la ricerca incentrata sulle Smart Roads è uscita da una fase puramente teorica, in attesa di essere applicata alle strade di nuova costruzione o per importanti interventi di manutenzione e valorizzazione.

Il rischio che non è stato, tuttavia, preso adeguatamente in considerazione è legato alla massiccia quantità di informazioni a cui il conducente sarà sottoposto, che potrebbe causare criticità durante lo svolgimento nella normale attività di guida – già sovraccaricata dall'uso di smartphone e/o altri dispositivi digitali – e un decadimento non previsto della prestazione di guida. Dal momento che, la digitalizzazione delle infrastrutture richiederà l'investimento di grandi risorse finanziarie che difficilmente potranno essere recuperate nel caso in cui si dovessero manifestare le suddette criticità, risulta necessario studiare in via preventiva e in maniera approfondita come l'applicazione di questi interventi influenzerà la normale attività di guida dei conducenti, valutandone la prestazione con metodi già testati in letteratura e con metodologie innovative.

Il presente lavoro di ricerca mira ad indagare l'impatto di questa trasformazione digitale sul principale attore del contesto stradale, ovvero il conducente.

Con un ampio lavoro di revisione dell'attuale letteratura scientifica e dei documenti tecnici esistenti, nell'introduzione, è stato esaustivamente spiegato il concetto di Smart Roads, il

contesto e i motivi che ne portano all'attuazione, nonché le principali tecnologie adoperate. Sono stati ampiamente trattati i campi di applicazione delle smart roads e le funzioni che esse possono espletare dal punto di vista di decongestionamento dei flussi di traffico, dell'impatto ambientale e della sicurezza.

Sulla base della letteratura esistente, nel Capitolo 3 sono state illustrate le differenti tecnologie in-vehicle attualmente presenti nei nuovi veicoli e il ruolo che esse giocano nel campo della sicurezza stradale. Per fare ciò, è stata indagata l'interazione che avviene tra il conducente e i dispositivi informativi di bordo (ADAS, smartphone, navigatori satellitari ecc.). Sulla base della letteratura esistente, sono stati analizzati diversi aspetti relativi all'interazione quali: l'effetto della tecnologia in-vehicle sul workload mentale dei conducenti, la distrazione visiva/cognitiva e le ricadute sulla performance di guida. A conclusione del capitolo, sono stati evidenziati i limiti degli studi finora condotti e le innovazioni apportate dal presente lavoro di ricerca.

Le Smart Roads

Al giorno d'oggi, il termine smart è spesso utilizzato per indicare un oggetto intelligente, ingegnoso, facile da comprendere. In realtà, questo termine può essere visto come l'acronimo di "Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology". Pertanto, le tecnologie smart includono tutte le applicazioni capaci di adattarsi ad un determinato contesto della strada, per migliorarne la gestione.

Il concetto di tecnologia smart ci porta al successivo concetto di Smart City, la cui concretizzazione avviene grazie al settore dell'ICTs (Obaidat e Nicopolitidis, 2016). La smart

city, in questo caso, integra diverse informazioni provenienti da sensori, tecnologie di comunicazione e vari dispositivi fisici per ottimizzare l'efficienza delle operazioni e dei servizi cittadini, al fine di garantire un futuro sostenibile, prospero e inclusivo per i propri cittadini (British Standard Institute, 2014).

Le tecnologie di informazione e comunicazione hanno reso possibile il progetto e l'implementazione di sistemi di trasporto intelligente (Perallos et al., 2015, Gordon, 2016). I sistemi ITSs combinano diverse tecnologie e servizi per ottimizzare la mobilità, al fine di rendere il settore dei trasporti più sicuro, efficiente e sostenibile (Meneguette et al., 2018). A tal proposito sorge l'interrogativo su quale sia il concetto che meglio definisce una smart road, nonché la funzione che essa deve svolgere.

Il concetto di Smart Road è stato indagato più volte in letteratura da diversi autori. A tal proposito, non è possibile individuare un'unica definizione di strada intelligente (Zhao, et al, 2015), poiché essa varia a seconda delle finalità e degli scopi perseguiti. In questo capitolo sono state raccolte le principali definizioni e funzioni trattate in letteratura, riferite al concetto di Smart Roads, nonché l'aspetto tecnologico che ne deriva.

Cap.2.1 Il concetto di smart road

La percezione generale delle infrastrutture sta subendo un processo “degenerativo”. Nello specifico, vi è una crescente associazione delle strade con i soli attributi negativi, quali: inquinamento, rumore, elevato tasso di incidentalità. La sfida sta nell'identificare gli attributi positivi delle strade intelligenti, o Smart Roads, per ridefinire il concetto stesso di strada. Le Smart Roads sono sistemi che stanno cambiando la concezione del traffico stradale attraverso l'utilizzo

di informazioni in tempo reale (Fernandez-Isabel et al., 2020). Questo concetto è supportato dalle nuove tecnologie ITS (Intelligent Transportation System) e da soluzioni road-based che rendono il trasporto di persone e merci più interessante, sicuro, confortevole e affidabile. Questa soluzione fornisce, inoltre, miglioramenti dal punto di vista ambientale, economico e sostenibile, non soffermandosi unicamente sul progetto e sulla costruzione di nuove infrastrutture, ma contribuendo, allo stesso tempo, alla manutenzione e al miglioramento del patrimonio esistente. Gli attributi chiave di una Smart Road possono essere distinti in due categorie: a) attributi strutturali, che sono una diretta conseguenza della progettazione, della costruzione e della manutenzione stradale; b) attributi soggettivi, o “emotivi”, che dipendono dalla percezione dei singoli utenti durante la guida. È possibile, a tal proposito, citare alcuni degli aspetti strutturali caratterizzanti una Smart Road.

- **Integrazione ottimale all'interno dell'ambiente e efficienza energetica:** riferito alla capacità del sistema stradale di rispettare alti livelli di protezione ambientale, minimizzare l'impatto ambientale associato, permettendo agli utenti di godere dell'ambiente circostante attraverso un'attenta integrazione paesaggistica. Allo stesso tempo questo approccio coinvolge lo sviluppo di modelli ottimizzati per ridurre il più possibile il consumo energetico e i livelli di emissione, massimizzando l'uso di materiali riciclati e di rifiuto. A tal fine, è importante tenere in considerazione l'intero ciclo vitale dell'infrastruttura stradale.

- **Livelli di servizio ottimali:** mediante un'avanzata gestione del traffico è possibile ottimizzare l'uso delle reti stradali esistenti, limitare le congestioni durante le ore di picco della domanda, e allo stesso tempo distribuire il traffico il più possibile per massimizzare i livelli di servizio offerti a tutte le ore. Questo approccio fa affidamento sulla trasmissione in

tempo reale di informazioni agli utenti stradali, e sul potenziamento dell'interazione tra gli utenti e le informazioni presentate.

- **Sostenibilità economica:** le strade progettate per il trasporto di massa di persone e merci sono economicamente giustificate nella maggior parte dei casi. Questo principio è tanto più importante quando si tratta di valutare il costo di esercizio e manutenzione di questa tipologia di infrastrutture. È quindi altamente consigliato procedere con dettagliate analisi costi-benefici, al fine di giustificare l'utilità di ciascun progetto stradale. Un dibattito completo deve essere anche intrapreso quando si è alla ricerca di partnership pubbliche-private che finanzino la costruzione di nuove infrastrutture e la manutenzione e il miglioramento della rete esistente.

- **Miglioramento della sicurezza:** che consiste nel seguire le migliori pratiche riconosciute a livello internazionale in merito al progetto delle infrastrutture e l'implementazione delle migliori soluzioni possibili inerenti la manutenzione, l'upgrading e la modernizzazione delle infrastrutture esistenti. La collaborazione in questo contesto contribuisce alla riduzione della mortalità stradale e del tasso di incidentalità attraverso una progettazione, costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali più efficace.

- **Copertura delle esternalità:** i costi esterni provenienti dallo spostamento di persone e merci nel contesto stradale devono essere minimizzati attraverso lo sviluppo di tecnologie per assorbire emissioni e rumore, minimizzare la probabilità di incidenti e collisioni, e inoltre garantire condizioni di flusso di traffico scorrevole per gran parte del tempo di viaggio.

- **Assicurazione della coesione regionale:** le strade convenzionali sono un modello di riferimento per l'effettivo sviluppo regionale, poiché offrono agli utenti un sistema di trasporto porta-porta alternativo, fornendo l'accesso a tutti i servizi sociali (e.g., lettura, cultura, salute, educazione, ecc.). Allo stesso tempo, è necessario non trascurare l'importanza delle strade nelle aree urbane e periferiche, che sono fondamentali per chi vive all'interno e all'esterno delle città.

- **Focus sulla co-modalità:** è anche importante riconoscere il ruolo chiave che giocano le strade in uno scenario realistico per l'effettivo uso di differenti modalità di trasporto combinate, con la visione di realizzare un utilizzo sostenibile delle risorse di trasporto. Le strade sono un collegamento inevitabile e essenziale per l'accesso a porti, aeroporti, stazioni, punti di connessione tra i bus ecc. Questo attributo unico delle infrastrutture stradali deve quindi essere evidenziato come un fattore complementare alle altre modalità di trasporto.

- **Adattabilità del servizio offerto:** nel tempo, tutte le modalità di trasporto hanno adattato con successo la propria offerta alle aspettative delle varie tipologie di utenti (treni ad alta velocità, trasporto ferroviario di merci, metropolitana, voli internazionali, jet privati, ecc.) e, allo stesso tempo, le relative infrastrutture sono state adattate a qualsiasi tipo di domanda di mobilità. D'altro canto, le strade hanno fornito un'unica soluzione per tutti gli utenti e per tutte le tipologie di viaggio, basandosi su due principali offerte: strade convenzionali e autostrade. È arrivato anche per le infrastrutture stradali il tempo di modificare le proprie caratteristiche attraverso una progettazione ottimizzata e una differenziazione in funzione degli utilizzi e degli itinerari.

- **Impegno sociale:** dati i loro attributi, le strade sono la sola modalità di trasporto che garantisce praticamente un accesso universale per lo spostamento di tutti gli utenti all'incirca con le medesime condizioni, indipendentemente dal loro stato economico e sociale. La natura universale di questo accesso, che incide drammaticamente sulla qualità dei servizi offerti, è ciò che posiziona questa modalità di trasporto come la pietra angolare principale dello sviluppo economico e sociale di un Paese avanzato. Una ragione che non può essere altresì trascurata è che le strade non sono utilizzate unicamente dai veicoli personali ma anche da veicoli di trasporto di massa che forniscono servizi sociali e accessibilità economica, per non menzionare altri veicoli, tra cui motocicli e biciclette.

- **Contributo economico:** questo è sempre stato e sarà sempre uno dei principali vantaggi della rete autostradale e del trasporto stradale. Le strade portano un enorme impatto positivo all'economia nazionale per via del loro contributo al prodotto interno lordo, al ricavo dovuto alle tasse governative e alla creazione di lavoro diretto e indiretto.

- **Strade user-oriented:** è tempo di andare oltre il concetto tradizionale che implica che i principali "committenti" dell'infrastruttura stradale siano sempre i governi regionali e nazionali. I veri clienti sono i cittadini che usufruiscono delle strade. Tenendo ciò a mente, le Smart Roads sono da definirsi e ridefinirsi su un processo già in corso che tiene in considerazione le aspettative degli utenti.

- **Tecnologia e innovazione:** tutti i parametri sopra citati richiedono un'azione decisa proveniente dalle parti interessate, sia pubbliche che private, attive nel campo tecnologico e nel campo scientifico relativo alle strade. L'innovazione gioca un ruolo chiave a tutti i

livelli, dalla fornitura di maggiori servizi effettivi legati allo sviluppo di nuovi materiali, all'attrezzatura stradale, a nuovi metodi di manutenzione stradale sostenibile e tanto altro.

È anche possibile identificare una serie di attributi soggettivi, o “emotivi”, riferiti al concetto di Smart Road, purché siano strettamente legati agli aspetti strutturali citati sopra.

- **Affidabilità:** le strade dovrebbero fornire garanzia nei termini della prevedibilità dei tempi di viaggio, dell'estensione, del flusso di traffico scorrevole per gran parte del giorno. Ciò richiede conseguentemente l'utilizzo sistematico di tecnologie avanzate per gestire l'attuale domanda da un momento a quello immediatamente successivo.

- **Sicurezza:** le strade dovrebbero essere la parte più importante di un sistema integrato che gestisce il rischio associato alle calamità naturali e/o causate dall'uomo, e inoltre fornisce un'adeguata risposta e tempi di recupero nei confronti di qualsiasi tipo di incidente.

- **Comfort:** buone condizioni di guida sono un parametro essenziale per assicurare la soddisfazione dell'utente e devono garantire un'adeguata visibilità dell'ambiente stradale e della segnaletica, nonché adeguate condizioni superficiali della pavimentazione e servizi lungo il percorso.

- **Modernità:** nella misura in cui nessun modello specifico è stato definito per ogni possibile tipologia di viaggio nel contesto stradale, gli utenti non classificano in genere le strade come una modalità di trasporto “avanzato”. Fare una distinzione tra trasporto di passeggeri e merci, tra viaggi rari e frequenti, tra viaggi a distanza media e lunga ecc., è la chiave fondamentale

per la progettazione di un sistema percepito dall'opinione pubblica come moderno e attrattivo.

- **Libertà:** lontano dall'associazione a tempi di partenza prefissati o limitata offerta di servizi che non necessariamente soddisfano le esigenze degli utenti, le strade diventano sinonimo di libertà (De La Peña, 2015).

Negli ultimi decenni, gli incidenti stradali sono diventati un problema importante per i governi, per i ricercatori e i produttori di veicoli. Essi possono causare morti, danni alle infrastrutture e alla salute. Per tale ragione vi è la necessità di sviluppare un protocollo atto ad evitare o prevenire tali incidenti per evitare la perdita di vite umane. (Aldegheishem et al., 2018).

La congestione delle strade sta imponendo un grande fardello in molte zone urbane. La congestione avviene quando la domanda di transito eccede la capacità della strada, e un approccio per ridurre questo problema si basa su un insieme di politiche atte ad incidere sulla domanda e sulla capacità a seconda delle circostanze e delle priorità locali. Queste politiche includono la costruzione di un maggior numero di strade per incrementare la capacità, ma anche l'introduzione di pedaggi e altre tasse per ridurre la domanda, promuovendo così il trasporto di massa o veicoli condivisi, e sviluppando una rete di comunicazione ad alta velocità. I fautori dell'Intelligent Vehicle/ Highway System o IVHS vedono ciò come una nuova tecnologia che produrrà un grande cambiamento nel trasporto stradale. Il controllo, la comunicazione e le tecnologie informatiche vengono combinate all'interno di un sistema IVHS che aumenterà significativamente la sicurezza e la capacità stradale, evitando la costruzione di nuove strade (Varaiya, 1993)

Il rilancio del settore delle infrastrutture di trasporto attraverso la digital transformation rappresenta un fattore che permette la crescita sostenibile, intelligente ed inclusiva del Paese, in grado di generare infrastrutture più snelle, di qualità, più sicure, più economiche, meglio utilizzate e fruite, che generino dati e servizi per una migliore esperienza del viaggio per i cittadini, per facilitare il trasporto delle merci e contribuire a determinare un ecosistema tecnologico favorevole per le imprese. L'iniziativa Smart Road vuole contribuire a creare un ecosistema tecnologico che permetta la comunicazione tra infrastrutture e veicoli di nuova generazione per l'adeguamento delle infrastrutture alle nuove esigenze di mobilità da parte dei viaggiatori e per la realizzazione di servizi innovativi (Standard funzionali per le Smart-Road – Position Paper, 2016).

Quando si parla di Smart Road System, appare immediatamente evidenziare che la strada dovrebbe essere libera da congestioni dovute al traffico, da incidenti, non dovrebbe presentare ammaloramenti di qualunque tipo, fornire servizi agli utenti stradali, avere flussi di traffico compatibili, avere adeguata segnaletica orizzontale e verticale e buona visibilità della strada (S. A. Ranveer et al., 2017).

La Smart Road è divenuta una soluzione efficiente per risolvere le sfide che la nostra rete stradale sta affrontando. Queste sfide includono il cambiamento climatico, il danno da fatica dovuto a carichi pesanti e la richiesta di uno sviluppo sostenibile. La nostra vita e l'ambiente in cui viviamo stanno progredendo verso soluzioni intelligenti, quali l'Intelligent Transportation System (ITS), l'Intelligent Building-Management System (IBMS) e altri sistemi intelligenti. Nel campo dell'ingegneria stradale l'intelligenza sta diventando la direzione principale della ricerca e dello sviluppo, il che significa che le Smart Roads

rappresentano il futuro della nostra rete stradale. Le funzioni di una Smart Road sono molteplici, pertanto, non vi è una definizione precisa (Zhao and Wu, 2015). Smart Highway e Smart Road sono termini che riuniscono in sé differenti proposte relative all'integrazione di tecnologie stradali atte a generare energia solare, migliorare le operazioni dei veicoli autonomi, l'illuminazione, e il monitoraggio delle condizioni della strada (Wikipedia). E le definizioni variano a seconda dei Paesi, delle Regioni e delle differenti sezioni stradali. Nel campo della scienza e della tecnologia, il mondo "smart" si riferisce alla "capacità di adattarsi compiendo decisioni simili a quelle umane, principalmente con l'utilizzo di sensori elettronici e tecnologia informatica" (American Heritage ® Dictionary of the English Language).

Una Smart Road può essere definita come un'infrastruttura stradale che integra al suo interno avanzate tecnologie di rete e comunicazione. In altre parole, è definita come una strada costituita da materiali strutturali performanti, reti percettive, centri di informazione, reti di comunicazione, sistemi energetici, e possiede la capacità di percezione attiva, di discriminazione automatica, di adattamento, di interazione dinamica e di alimentazione energetica costante (Zhao and Wu, 2015).

Messa a confronto con una strada convenzionale, una Smart Road dovrebbe essere in grado di allungare la propria vita utile (Lamb et al., 2011), incrementando le proprie prestazioni, riducendo i rischi inerenti la sicurezza migliorando la qualità dei servizi.

Possono essere utilizzate varie tecnologie nello sviluppo e nell'uso di una Smart Road, includendo l'impiego di: materiali intelligenti, distribuzione di fibre ottiche, rivestimenti, dispositivi piezoelettrici, sensori tradizionali, e così via. (Sun et al, 2018).

Una Smart Road si affida a materiali o sensori per monitorare in maniera attiva il proprio stato, le prestazioni, l'ambiente e il comportamento (Lajnef et al., 2013; Hautière and Bourquin, 2017); dopodiché essa stessa calibra, integra, gestisce, analizza, diagnostica e valuta automaticamente i dati raccolti. Basandosi sui dati elaborati, la Smart Road può auto-adattarsi alle variazioni di temperatura, umidità, traffico, e così via, e può riparare attivamente qualsiasi tipo di danno. Una Smart Road dovrebbe, inoltre, essere un sistema autosufficiente che mantiene le funzioni finora menzionate usando energia auto-generata (Sun et al, 2018).

I sistemi di trasporto giocano un ruolo critico in quasi tutti gli aspetti della vita moderna. Tuttavia, le sfide significative rimangono quelle di migliorare ulteriormente l'efficienza e la sicurezza nello sviluppo delle applicazioni correlate. L'attuale generazione di veicoli è già equipaggiata con differenti tipologie di sensori, CPU, sistemi software, e capacità di comunicazione, AEB ecc. Col tempo, anche le infrastrutture stradali inevitabilmente devono subire dei processi di rinnovamento in modo tale da fornire migliori soluzioni di rilevamento (con l'aggiunta di altri benefici), ma ciò richiederà più tempo; questo processo evolutivo in relazione alle molteplici difficoltà correlate inevitabilmente sarà un processo relativamente lento. Alcuni esempi di tecnologie già esistenti includono il controllo remoto, sistemi di messaggistica, sensori RFID ecc. Ciò porta alla definizione degli spazi intelligenti, ovvero spazi in grado di monitorare continuamente cosa sta accadendo al proprio interno, comunicare con gli utenti, prendere le relative decisioni e agire sulle stesse (Wang et al., 2006).

L'aumento del traffico rappresenta una criticità per tutti gli ordini di strade, obbligando le autorità competenti ad intervenire a livello locale, metropolitano, regionale e statale.

Le maggiori problematiche insorgono per i seguenti livelli:

- aumento del livello di congestione
- eccesso di velocità dei veicoli personali
- ritardi nei tempi di viaggio
- perdita di vite umane e beni
- incremento dei livelli di inquinamento e sviluppo economico ritardato.

Vi è la necessità di gestire il traffico e i relativi problemi correlati con una soluzione smart. La risoluzione di tutti i problemi sopra elencati può trovare una valida soluzione nello sviluppo di smart Roads, ciò al fine di utilizzare un sistema di trasporto intelligente sia per le arterie principali che per quelle secondarie. Una Smart Road, a differenza di una strada tradizionale, è equipaggiata con una varietà di sensori e dispositivi elettronici che aiutano ad individuare problemi rilevanti e a trovare soluzioni fattibili, per migliorare l'efficienza operativa del sistema (Mahairzi and Reddy, 2017).

Con il termine Smart Highway si intende quel processo atto a rendere le autostrade più sicure, intelligenti ed efficienti nella gestione energetica con il fine di generare elettricità utilizzando energia solare, energia vibrazionale, energia eolica, per la ricarica dei veicoli che utilizzano tali fonti di energia, per l'illuminazione e per monitorare le condizioni della strada (Kalyani et al., 2015).

Una delle più importanti applicazioni dell'Internet of things (IoT) nelle città intelligenti, o Smart Cities, è l'Intelligent Transportation System (ITS). Il sistema di trasporto intelligente prevede la comunicazione Veicolo-Veicolo (V2V) e Veicolo-Infrastruttura (V2I) migliorando

la gestione delle infrastrutture stradali. In maniera molto sintetica è possibile affermare che i veicoli connessi (Connected Vehicles - CVs) equipaggiati con tecnologie di comunicazione avanzate permetteranno uno scambio di informazioni tra i vari elementi del sistema di trasporto, configurando ciò che è genericamente individuato con l'acronimo V2X o Vehicle-to-Everything (Coppola e Silvestri, 2019). Una rete V2X ingloba diverse tipologie di connessione: V2V (Vehicle-to-Vehicle), V2I (Vehicle-to-Infrastructure), V2P (Vehicle-to-People), V2N (Vehicle-to-Network) (Pompigna e Mauro, 2021).

Questo è possibile poiché l'ITS utilizza avanzate tecnologie di informazione e comunicazione, e tali tecnologie saranno utili per ridurre la congestione di traffico e gli incidenti stradali, molto pericolosi soprattutto nelle zone urbane. La potenzialità relativa alla connessione di Smart Roads è molto grande. Non solo perché incrementeranno la sicurezza regolando la velocità dei veicoli e implementando dei sistemi di avvertimento, ma anche perché trasmetteranno dati in tempo reale e condivideranno informazioni attraverso la rete, rendendo più semplice e veloce il transito e il parcheggio dei veicoli, nonché la connessione tra gli stessi (Janahan et al., 2018).

Attualmente vi sono più di 150 progetti riguardanti l'automazione del traffico. Il principale svantaggio è che questi progetti risultano essere frammentati. Vi sono versioni separate di realizzazioni lacunose. Non vi è alcun sistema che combini differenti tecnologie e che sia capace di risolvere le molteplici sfide a livello globale. La nuova idea che supporta questo progetto non ha il solo scopo di risolvere i problemi esistenti nel sistema di controllo del traffico, bensì anche quello di offrire un'opportunità unica per tutti gli utenti stradali, aprire la prospettiva di sviluppo di sistemi hardware e software per la crescita delle infrastrutture.

L'interesse sta nell'utilizzo di una nuova strategia per gestire e introdurre innovazioni nel processo di controllo del traffico, anche perché vi è una crescente domanda delle tecnologie IT applicate ai dispositivi dei nuovi veicoli. L'unicità del progetto sta nella combinazione delle moderne tecnologie IT, modelli matematici e strumenti tecnologici hardware all'interno di un singolo sistema integrato (Ziarmand, 2013).

Una strada intelligente è un concetto innovativo correlato alle Smart Roads e alle future Smart Cities. È un programma di innovazione che collega differenti modi di vedere le cose con idee innovative che applicano le opportunità offerte dalle nuove tecnologie nell'ambito smart. Al giorno d'oggi la sicurezza stradale è diventata un fattore importante della nostra vita per via dell'incremento del numero di incidenti e per la mitigazione di questi ultimi nei punti in cui avvengono più frequentemente, come incroci e curve. Inoltre, vi sono problematiche legate all'interazione tra traffico ed eventi naturali calamitosi che devono essere gestiti in modo ottimale (Adwani et al., 2015).

Le strade equipaggiate con sensori nel loro sviluppo raccolgono in maniera continua dati sui veicoli transitanti. Attraverso analisi in tempo reale di questi dati, combinati ai dati meteorologici e informazioni relative ai veicoli che si stanno immettendo in autostrada attraverso le corsie di accelerazione, il sistema è capace di individuare l'incremento di densità di traffico e allertare i gestori con avvisi di rallentamento previsto. Il sistema trasmette percorsi alternativi, apre corsie addizionali, e riduce i limiti di velocità attraverso segnaletica dinamica presente lungo il percorso. Il veicolo del conducente riceve questi dati, conferma che il tempo di percorrenza nel percorso originale rimane entro parametri accettabili, e prenota uno spazio di parcheggio, basandosi sul tempo di arrivo. Durante tutta l'attività di

guida, il veicolo e gli altri veicoli connessi sulla strada comunicano tra loro con gli ITS, mantenendo velocità e distanze di sicurezza. Il bello dei veicoli connessi, ed eventualmente autonomi, è la promessa di una guida più piacevole, sicura e produttiva. I veicoli connessi aumenteranno la propria partecipazione in un ecosistema che comprende l'ITS e le Smart City, riducendo i fattori di stress generalmente frequenti nei contesti urbani con alta densità di traffico. Questo sistema intelligente e in continua espansione, ricco di dati in tempo reale e alimentato da analisi predittive, darà maggiore visibilità alle società nel controllo, ad esempio, della propria flotta di veicoli, catena di fornitura e logistica più efficiente, costi ridotti e migliore servizio per i clienti. Gli ITS supporteranno in maniera sicura i conducenti, con maggiori informazioni e attività durante la guida, aiutandoli a compiere nella maniera adeguata le varie decisioni. Eventualmente, il sistema consentirà l'introduzione e lo sviluppo della guida autonoma, convertendo i veicoli in un'estensione mobile della propria abitazione o del posto di lavoro, cambiando completamente l'esperienza di guida. La visione ITS è quella di creare un sistema intelligente, predittivo e capace di auto-apprendere, migliorando la sicurezza stradale. Esso comprenderà anche il trasporto multimodale, dai camion agli autoveicoli, alle biciclette e scooter, tram e treni, aiutando così gli individui nella transizione tra le differenti modalità di trasporto. Gli ITS devono anche provvedere una protezione ambientale migliorando l'efficienza nel consumo di carburante dei veicoli o avvisando i conducenti di utilizzare il trasporto di massa per evitare congestioni. Per raggiungere questi obiettivi, il concetto di ITS integra la comunicazione vehicle-to-vehicle (V2V) e vehicle-to-infrastructure (V2I), equipaggiando le strade con sensori, videocamere digitali di sorveglianza, segnali elettronici, segnali di traffico, pedaggi, ecc. L'ITS incorporerà anche i dati sui report metereologici, sugli stalli di parcheggio, ecc. Tutti questi dati verranno analizzati in tempo reale dal sistema per poi essere condivisi con i veicoli e altri oggetti nella

rete, come ad esempio la segnaletica digitale. L’Australia sta utilizzando l’ITS per la gestione attiva dei viaggi, informazioni in tempo reale per i conducenti, telemetria del veicolo e gestione ferroviaria. L’UK e la Svizzera utilizzano da tempo le videocamere digitali di sorveglianza nelle principali arterie per velocizzare i tempi di risposta in caso di emergenza. La Cina sta integrando la tecnologia cloud, Big Data, e dispositivi connessi all’interno di una piattaforma ITS che connette milioni di veicoli commerciali su internet e tra di loro. L’U.S. ha recentemente avviato molteplici iniziative per l’adozione e l’utilizzo della tecnologia ITS. Questa abbondanza di connessioni porterà a delle opportunità di business relative all’ITS e ai veicoli connessi.. Gli OEMs (Original Equipment Manufacturer) potranno implementare nuove caratteristiche nei veicoli basate sulle capacità dell’ITS, ad esempio calcolare i percorsi e regolare la velocità dei veicoli. I fornitori potranno utilizzare i dati ITS per creare servizi di abbonamento personalizzati sui propri veicoli, ad esempio, potrebbero prevedere una soluzione che combini la telematica dei veicoli con i dati dei sensori ITS per individuare una pressione anomala delle ruote e avvisare un centro di assistenza stradale, provvedendo ad una manutenzione preventiva prima che lo pneumatico collassi. L’ITS potrà inoltre catturare dati capaci di rivelare nuovi modelli e approfondimenti su opportunità di business per qualsiasi tipo di industria (Radhakrishnan and Satyavolu, 2016). Al giorno d’oggi il traffico risulta essere uno dei principali problemi per le persone. L’aumento di traffico è dovuto alla maggiore disponibilità dei veicoli all’interno della strada. Tipicamente, l’infrastruttura stradale è poco fornita di tecnologie avanzate. Il sistema stradale automatizzato è definito come “una corsia o una serie di corsie nelle quali veicoli equipaggiati con tecnologie avanzate possano viaggiare sotto controllo remoto”. Questo è uno degli aspetti dell’Intelligent Transportation System (ITS), che consiste nell’applicare tecnologia elettronica ed informatica sviluppata per l’aviazione, e per i programmi spaziali e di difesa, al fine di migliorare le

infrastrutture stradali e il trasporto. L'automazione di veicoli e strade porterebbe alla riduzione dei rischi di incidente, migliorerebbe la sicurezza, aumenterebbe la capacità delle infrastrutture, ridurrebbe i consumi di carburante e migliorerebbe il comfort generale e la prestazione dei conducenti. Il potenziale delle Smart Roads è enorme. Non solo perché provvederebbero alla nostra sicurezza regolando la velocità dei nostri veicoli e implementando sistemi di warning, ma anche trasmettendo in tempo reale dati e condividendo informazioni in rete, rendendo più semplice e veloce la circolazione, il parcheggio e la comunicazione tra gli utenti stradali (Kumar et al., 2017). Ne consegue che le smart roads rappresentano il prossimo futuro della rete stradale. L'aspetto "intelligente" sta diventando la direzione principale della ricerca e dello sviluppo nel campo dell'ingegneria stradale, ma anche delle costruzioni e del management (Zhao and Wu, 2015). L'utilizzo integrato di applicazioni di Building Information Modeling (BIM) (Costin et al, 2018; Jing et al., 2019) e di sistemi di trasporto intelligenti (ITS) (Gordon, 2016; Lin et al., 2017) è promotore di innovazione, automazione, connettività, sicurezza e risparmio. In Italia l'avvento delle Smart Roads è avvenuto in seguito ad una specifica legge emanata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), il cosiddetto Decreto Smart Road (Ministero Infrastrutture e Trasporti. DM 28/02/2018)

Cap.2.2 Le funzioni principali di una smart road

Dalla revisione effettuata nel paragrafo 2.1 in merito al concetto di Smart Road, è stato possibile delineare le potenzialità e i benefit associati alla digitalizzazione delle strade. Per un'adeguata classificazione delle funzionalità di una Smart Road, si riporta di seguito l'approccio di Zhao & Wu (2015), ripreso successivamente da Pompigna e Mauro (2021).

Secondo questi autori, una strada intelligente può essere classificata sulla base di quattro elementi:

- **self-awareness**: definita come la capacità di monitorare le condizioni stradali (compresi i flussi di traffico) automaticamente e in tempo reale;
- **interazione tra le informazioni**: definita come la capacità di connettere i veicoli intelligenti attraverso un sistema di comunicazione basato su una rete di sensori e database;
- **self-adaptation**: definita come la capacità di regolare automaticamente le differenti condizioni della strada;
- **accumulo di energia**: definita come la capacità di immagazzinare energia green attraverso la pavimentazione e altre infrastrutture, al fine di alimentare l'intero sistema smart, o ulteriori oggetti esterni.

Tale classificazione è schematizzata in Fig. 1.2.

Fig. 1.2. Principali funzioni di una Smart Road (Pompigna e Mauro, 2021)



Sopra, tali funzioni verranno illustrate nel dettaglio.

Cap.2.2.1 Monitoraggio attivo dell'infrastruttura

La funzione di self-aware permette di monitorare automaticamente le condizioni stradali. Per differenti infrastrutture stradali le richieste di monitoraggio sono differenti. Zhao and Wu (2015) suddividono l'area di self-aware in quattro funzioni, sulla base delle differenti componenti dell'infrastruttura stradale:

- **self-aware della pavimentazione:** condizioni superficiali, strutturali e prestazionali della pavimentazione;
- **self-aware del sottofondo:** condizioni di base e strutturali del sottofondo;
- **self-aware dei versanti:** condizioni di stabilità del versante;

- **self-aware dello stato di traffico**: volume di traffico, tipologia di veicoli, distribuzione di percorrenza, condizioni di congestione del traffico;

La funzione di self-aware mira a gestire le differenti condizioni stradali mediante: l'impiego di nuovi materiali, il progetto di una nuova struttura o la dotazione di componenti intelligenti. L'area del self-adapt, invece, può essere classificata in sei categorie, a seconda delle condizioni a cui la strada viene sottoposta:

- **self-repair**: riparazione della strada danneggiata senza le tradizionali operazioni sul campo;

- **self-melt**: fusione e scongelamento automatico della neve per evitare la condizione di pavimentazione congelata;

- **self-drain**: drenaggio veloce dell'acqua sulla pavimentazione per evitare incidenti durante le precipitazioni;

- **self-temperature-control**: controllo della temperatura della pavimentazione o del sottofondo per prevenire danni causati dalle alte o basse temperature;

- **self-clean**: assorbimento dei gas di scarico e riduzione del rumore proveniente dai veicoli;

- **self-traffic-adjust**: modifica delle componenti stradali (come la segnaletica orizzontale) al fine di regolare lo stato del traffico;

Nell'era moderna, uno dei maggiori problemi che la nostra società sta affrontando è l'incremento esponenziale della congestione veicolare. Mentre il numero di veicoli sta

crescendo ad un ritmo elevato, le infrastrutture, dal loro canto, non riescono a sostenere questo incremento. Le congestioni di traffico nelle ore di punta stanno divenendo una routine, specialmente nei settori interni dove lunghe code di veicoli possono rimanere bloccate. Per contrastare questo problema diversi autori hanno investigato possibili soluzioni relative a sistemi intelligenti per la gestione e il controllo del traffico. Alcuni di questi studi vengono elencati nel seguito.

Kanungo et al. (2014) hanno proposto una soluzione per ridurre la congestione di traffico utilizzando delle videocamere di sorveglianza in corrispondenza delle intersezioni stradali. Tali sistemi non richiedono l'installazione di alcun componente hardware aggiuntivo. Le telecamere catturano video che vengono successivamente trasmessi ai server che li analizzano mediante tecniche di elaborazione dell'immagine, rilevando una certa densità di traffico. Viene utilizzato un algoritmo per cambiare la luce del semaforo in funzione della densità di traffico rilevata.

Khekare and Sakhare (2013) hanno proposto lo sviluppo di VANETs (Vehicular Ad Hoc Networks). Questa tecnologia permette la comunicazione reciproca tra veicoli e tra questi ultimi e le Road Side Units (RSUs). Il lavoro è basato sulla struttura di una smart city che trasmette informazioni relative alle condizioni di traffico e aiuta i conducenti a prendere decisioni intelligenti per prevenire il fenomeno di congestione veicolare.

Badura and Lieskovsky (2010) hanno presentato un nuovo modello per sistemi di traffico intelligenti, che ingloba le informazioni provenienti dalle videocamere di sorveglianza presenti alle intersezioni e, con l'aiuto di sistemi di trasmissione, permette agli utenti di

accedere a quei dati. Varie sperimentazioni condotte a riguardo hanno mostrato un grande potenziale in termini di efficienza e di esecuzione in tempo reale.

Salama et al. (2010) hanno progettato un sistema intelligente integrato, per la gestione e il controllo dei semafori con l'ausilio di sensori fotoelettrici. Il sistema monitora il traffico e trasferisce i dati ad un centro di controllo che può gestire i semafori in funzione della lettura dei dati provenienti dai sensori, utilizzando un algoritmo basato sul peso relativo di ciascuna strada. Il sistema aprirà il traffico per la strada che risulterà più affollata e assegnerà un maggiore tempo di svuotamento rispetto alle strade meno congestionate. Il sistema può, altresì, essere programmato per gli scenari di emergenza (passaggio di ambulanze, vigili del fuoco ecc.) che richiedono un livello di congestione nullo. Il sistema proposto può essere settato in maniera tale da funzionare automaticamente o permettere l'intervento umano.

Zhao et al. (2009) hanno presentato un modello di sistema di controllo intelligente del traffico basato su DSP e Nios II. Il vantaggio del sistema proposto da Kanungo et al. (2014) è legato al fatto che non necessita di installare hardware su ciascun veicolo come nel caso del sistema VANETs proposto da Khekare and Sakhare (2013). Inoltre non necessita di costante manutenzione (come nel caso di Salama et al., 2010; Zhao et al., 2009) ed è meno incline a guasti.

Cap.2.2.2 Interconnessione tra veicoli e infrastruttura

Al fine di connettere le infrastrutture stradali, i gestori delle stesse, e i veicoli, è necessario che venga predisposto un centro di scambio informazioni. L'interazione tra queste figure prevede l'upload dei dati provenienti dai veicoli e dall'ambiente, al fine di generare dei

messaggi automatici di warning per i conducenti. I dati relativi alle condizioni dell'infrastruttura si ottengono dai sensori che svolgono la funzione di self-aware, i dati sul traffico e sui veicoli si ottengono dal sistema di interazione veicolo-strada.

Il centro di scambio informazioni è uno strumento per visualizzare i dati raccolti e analizzarli. Una volta fatto ciò, i dati verranno restituiti ai dispositivi di self-adapt e ai veicoli, riducendo la ridondanza degli stessi. Inoltre i dati analizzati verranno inviati anche agli enti gestori.

Possono essere utilizzate tecnologie di comunicazione wireless per il collegamento della rete di sensori. L'interazione tra veicoli e strada mira a garantire la sicurezza e l'efficienza stradale (Zhao and Wu, 2015).

Con il crescente sviluppo delle tecnologie wireless, sono stati investiti considerevoli sforzi nell'area di ricerca inerente la connessione inter-veicolare. L'obiettivo è quello di incrementare la sicurezza e il comfort dei conducenti mediante la trasmissione delle informazioni tra i veicoli. In futuro è previsto che i veicoli siano capaci di prevedere ed evitare possibili collisioni, identificare gli stalli di parcheggio liberi, minimizzare le emissioni e percorrere l'itinerario più veloce per raggiungere la destinazione prevista, servendosi delle comunicazioni in tempo reale sul traffico. Individuare i requisiti di comunicazione è la chiave per selezionare un appropriato canale di comunicazione per raggiungere gli obiettivi prefissati. Dar et al. (2010) hanno analizzato i requisiti di comunicazione per le applicazioni ITS e hanno tracciato alcune linee guida per la scelta delle tecnologie adatte a soddisfare le necessità di comunicazione.

Parlando della comunicazione tra veicoli e ambiente esterno, in un contesto stradale, le modalità previste possono essere suddivise in due gruppi: Vehicle- to-Infrastructure (V2I) e Vehicle-to-Vehicle (V2V). Il secondo è suddiviso, a sua volta, in due sottocategorie: a) comunicazione diretta V2V, in cui un veicolo comunica direttamente con un altro, senza il coinvolgimento di terze parti; b) comunicazione indiretta, in cui due veicoli comunicano attraverso una mediazione di terze parti.

La direzionalità dell'informazione include la comunicazione a senso unico (one-way) o a doppio senso (two-way). La prima è usata per applicazioni informative, mentre la seconda viene utilizzata per applicazioni interattive. La banda di operatività è l'intervallo di frequenze entro il quale il canale di comunicazione opererà. Le modalità di trasmissione possono essere sia "unicast", in cui i dati vengono trasmessi ad una sola particolare unità di destinazione, che "broadcast", in cui i dati vengono trasmessi a unità di destinazione multiple, che "geocast", in cui le informazioni vengono trasmesse solo ad unità di destinazione situate nelle vicinanze. La latenza definisce l'intervallo di tempo che intercede tra l'istante di generazione del pacchetto dati da parte della trasmittente e l'istante di invio al destinatario. Il Data Rate rappresenta il numero di bit trasmessi nell'unità di tempo. Il range di comunicazione è la massima distanza supportata tra due unità comunicanti. La mobilità rappresenta il supporto per la mobilitazione delle unità di comunicazione. L'affidabilità di un sistema di comunicazione assicura che i dati raggiungano la propria destinazione con un basso tasso di errore. Infine, la priorità definisce quale applicazione è più sensibile a ritardo, e deve avere la precedenza nell'acquisire il canale di comunicazione, o che deve avere la maggiore larghezza di banda in un momento particolare. Le principali tecnologie di comunicazione all'interno del sistema Smart Road verranno approfondite nel paragrafo successivo.

Cap.2.2.3 Impatto ambientale e generazione di energia “Green”

Finora abbiamo osservato gli aspetti legati alle capacità di monitoraggio delle strade intelligenti che, indubbiamente, portano a diversi vantaggi in termini di impatto ambientale. Il traffico ha un forte impatto su diversi aspetti della nostra vita quotidiana: il tempo speso all'interno di ingorghi, l'aumento delle emissioni inquinanti, il consumo di gas e risorse, ecc. (Kuang et al., 2019). In accordo con la WHO (*World Health Organization, 2021*), il settore dei trasporti è responsabile di livelli significativi di inquinamento atmosferico, e più dell'80% della popolazione che vive in un contesto urbano, sperimenta una qualità dell'aria eccedente i limiti imposti dalle linee guida della WHO (Macikag et al., 2019). Basti pensare che la riduzione della congestione dei flussi di traffico e l'ottimizzazione degli stessi, mediante l'uso di sensori e tecnologia ITS, contribuirà a ridurre i consumi di carburante degli utenti stradali.

Si è spesso parlato dello stile di guida ecologico, il quale è stato ritenuto per decenni promotore di sostenibilità ambientale, mediante la riduzione dei consumi di carburante e delle emissioni (Barkenbus, 2010; Zarkadoula et al., 2007). Questo stile di guida si riferisce, tradizionalmente, a tutte quelle tecniche e comportamenti di guida adottati dal conducente per ridurre consumi ed emissioni, non prevedendo necessariamente un upgrade della tecnologia veicolare.

Negli ultimi anni, vi sono stati rapidi avanzamenti nell'industria dei trasporti, e le nuove interfacce uomo-macchina (HMI) sono state progettate e sviluppate al fine di promuovere uno stile di guida ecologico (Strömberg and Karlsson, 2013; Barth and Boriboonsomsin, 2009). Tali sistemi in-vehicle hanno registrato riduzioni dei consumi di carburante compresi

tra il 5% e il 20%, a seconda dello scenario di guida (*Barth e Boriboonsomsin, 2009; Birrel et al., 2014; Strömberg and Karlsson, 2013*). L'eccessivo utilizzo di petrolio non si limita ad incrementare le spese legate alla mobilità individuale, bensì contribuisce anche all'incremento delle emissioni di inquinanti nell'aria. La riduzione del consumo di carburante può effettivamente minimizzare le emissioni e contribuire al mantenimento di un ambiente pulito (*Nasir et al., 2014*). *Guerrieri et al. (2020)* hanno effettuato un confronto tra autostrade convenzionali e smart, dimostrando che l'utilizzo simultaneo della stabilizzazione della calce e delle pavimentazioni in asfalto rigenerato riducono considerevolmente i consumi di carburante (fino al 35%) e le emissioni di inquinanti (fino al 34%) rispetto all'utilizzo del classico materiale vergine. Inoltre, i benefici ambientali crescono al crescere della percentuale di pavimentazione rigenerata. Un'altra importante peculiarità delle Smart Roads, in termini di impatto ambientale, è la capacità di alimentare il proprio sistema attraverso energia auto-generata. L'energia, così prodotta, viene definita "green" in quanto garantisce la sostenibilità ambientale, ovvero permette di soddisfare i bisogni dell'utenza stradale senza compromettere l'ambiente circostante. L'energia "green" (vibrazionale, solare, eolica) può essere convertita in elettricità in modo tale da alimentare le applicazioni e i servizi legati all'infrastruttura stradale: caricare i veicoli, alimentare i sensori per il monitoraggio, favorire l'illuminazione stradale, ecc. A tal proposito vengono elencate di seguito le principali tipologie di energia utilizzata indagate in letteratura. Vi sono differenti tipologie di *green energy* associate all'utilizzo stradale (Tab. 1.1.). Energia meccanica, energia termica ed energia solare sono quelle più praticabili. In recenti ricerche sono state studiate varie tecnologie per la raccolta di energia, tra cui: materiali piezoelettrici, tecnologia termoelettrica, pannelli fotovoltaici, ecc. (*Zhong 2013; Zhao et al., 2011*).

Funzioni	Tecnologie	Problemi	Disponibilità	Costi
Raccolta di energia meccanica	Generatori piezo-elettrici	Durabilità dei generatori	Media	Alti
Raccolta di energia termoelettrica	Convertitori termoelettrici	Durabilità e efficienza dei convertitori	Bassa	Sconosciuti
Trasferimento di calore diretto	Tubi incorporati con liquido	Efficienza di raccolta	Media	Sconosciuti
Raccolta di energia solare	Pannelli fotovoltaici incorporati	Struttura della pavimentazione	Bassa	Sconosciuti
	Dispositivi fotovoltaici a bordo strada		Alta	Bassi

Tab.1.1. Tecnologie di raccolta di energia e principali problemi associati (*Zhao and Wu, 2015*)

L'elettricità è divenuta uno dei cardini rappresentativi della civilizzazione al giorno d'oggi, per cui la domanda è molto vasta e tende a crescere costantemente. Per tale ragione è importante produrla senza generare inquinamento. Diverse forme di energia alternativa -

nonché il loro utilizzo sostenibile - sono state indagate per risolvere il problema relativo al gap tra domanda e offerta di energia elettrica. D'altra parte il traffico stradale sta aumentando giorno dopo giorno, e ciò porta all'inevitabile congestione delle strade. La correlazione tra la domanda di energia e l'incremento di traffico porta a pensare ad una possibile soluzione stradale che possa immagazzinare l'energia dai veicoli transitanti. Per tale ragione, si è pensato all'impiego di materiale piezoelettrico inserito all'interno della pavimentazione stradale che potrebbe provvedere alla conversione della pressione esercitata dai veicoli transitanti in corrente elettrica. *Kumar (2013)* parla di una fonte alternativa di energia ottenuta mediante l'utilizzo di materiali piezoelettrici, una classe di *smart materials*. Una strada piezoelettrica produrrà, quindi, elettricità derivante dallo stress subito, dovuto al transito degli autoveicoli. Il sistema è basato sull'utilizzo di cristalli metallici inseriti nella pavimentazione per centinaia di metri al fine di generare elettricità al passaggio dei veicoli. L'effetto piezoelettrico è inteso come l'interazione elettromeccanica lineare tra lo stato meccanico ed elettrico nei materiali cristallini (cristalli, certe ceramiche, materiali biologici come le ossa, DNA e varie proteine). L'effetto piezoelettrico è un processo reversibile, ovvero si ha la generazione interna di carica elettrica dall'applicazione di una forza meccanica e, viceversa, una generazione meccanica di sollecitazione da un campo elettrico applicato. La proprietà dei materiali piezoelettrici di produrre elettricità tramite compressione è, quindi, impiegata per immagazzinare l'energia dei veicoli in movimento rendendo la strada "*Piezo-Smart*". Questa nuova superficie si serve dei cristalli per generare fino a 400 kilowatt di energia da un tratto di un chilometro (un progetto ideato da Haim Abramovich, uno sviluppatore del Teknion-Israel Institute of Technology in Haifa, Israele) abbastanza per sostenere otto macchine elettriche. Un chilometro di "*Piezo-Smart Road*" potrebbe generare abbastanza energia per 40 case, e i progressi nella tecnologia potrebbero

portare all'alimentazione dell'intera rete elettrica nazionale. Il concetto si basa sul fatto che l'energia consumata dal veicolo (proveniente dalla combustione del carburante) viene utilizzata per diverse applicazioni, una di queste è quella di vincere la resistenza al rotolamento. Una tipica pavimentazione stradale può essere descritta come un materiale visco-elasto plastico, con l'elasticità sua principale caratteristica. Quando un veicolo transita sulla strada, quest'ultima devia verticalmente. Questa deviazione è rilasciata come energia termica. Per una strada incorporata con generatori piezoelettrici, parte dell'energia del veicolo si traduce in deformazioni del manto stradale, trasformandosi così in energia elettrica (attraverso effetto piezoelettrico) invece di andare persa come energia termica (calore). Per cui un generatore piezoelettrico ha la funzione di convertire l'energia meccanica delle deformazioni della strada in elettricità che verrà immagazzinata nelle batterie o connessa direttamente alla rete. Quest'energia immagazzinata può essere utilizzata per alimentare luci stradali, sensori di velocità, cartelloni a bordo strada, ecc. Da ciò è intuitivo che se l'infrastruttura stradale è più congestionata, verrà prodotta una quantità maggiore di energia. Quando applicata alle strade, la tecnologia piezoelettrica può produrre fino a 44 megawatt di elettricità l'anno da un singolo tratto di strada di lunghezza pari ad un chilometro e rispondere ad una domanda di energia di circa 30.800 famiglie. *Kumar (2013)* illustra i principali vantaggi e svantaggi delle *Piezo-Smart Roads*. Tra i vantaggi abbiamo:

- Il movimento veicolare nelle strade congestionate è costante per cui, l'energia può essere generata in maniera costante;
- L'energia generata dalle *Piezo-Smart Road* è green e non danneggia l'ambiente;
- Quest'energia può essere utilizzata benissimo per l'illuminazione stradale e altri scopi

minori;

- Questa fonte di energia elettrica è un investimento a lungo termine, ha il merito di essere una fonte continua, indipendente e non affetta dalle condizioni climatiche.

Tra gli svantaggi abbiamo:

- Al giorno d'oggi le strade devono essere riviste per l'implementazione di questa tecnologia;
- Questo produrrebbe congestione di traffico e la necessità di un opportuno piano di gestione.

I risultati ottenuti da *Jeon et al. (2021)*, mostrano che l'accumulatore piezoelettrico da loro proposto, potrebbe essere utilizzato come fonte di energia per alimentare i veicoli elettrici, nonché la sensoristica presente nelle smart roads.

Un'altra fonte di energia green è quella proveniente dalle radiazioni solari. L'energia solare può essere utilizzata in tre modi:

- Per la conversione in energia termica
- Per la conversione in elettricità
- Per la fotosintesi

Per generare energia termica è necessario utilizzare dei collettori solari. Nei sistemi fotovoltaici l'elettricità è direttamente prodotta dall'energia solare ed il suo funzionamento è basato sul principio dell'effetto fotoelettrico.

I pannelli sono costituiti da celle fotovoltaiche composte da semiconduttori,

generalmente in silicio, che assorbono la luce. L'energia associata alla radiazione solare crea un flusso di elettroni nei semiconduttori e da tale flusso viene generata l'elettricità. L'energia solare, così prodotta, può alimentare i veicoli elettrici, riducendo i consumi di carburante derivanti da combustibili fossili e di conseguenza l'inquinamento associato. Infine, un'ulteriore fonte di energia che mira a ridurre l'impatto ambientale, è quella prodotta dal vento. Il vento è causato dalle differenze di pressione atmosferica e l'energia generata dal suo flusso è definita energia eolica. Anch'essa, come quella solare, può essere utilizzata, in alternativa ai combustibili fossili, in maniera sostenibile e senza causare inquinamento. Quando una particella di aria viene investita da un oggetto in movimento si sviluppa una pressione che viene trasmessa agli oggetti circostanti. Grazie a questo fenomeno è possibile installare delle turbine eoliche in corrispondenza della sommità dei lampioni per l'illuminazione stradale. Una turbina eolica è un dispositivo che converte l'energia cinetica del vento in energia elettrica. Il posizionamento di queste turbine nel contesto stradale deve essere ottimale e garantire la maggiore produzione di elettricità. A tal proposito, è consigliabile posizionarle nella zona mediana, in maniera tale che esse possano carpire i flussi di aria derivanti dal passaggio dei veicoli in entrambe le direzioni. Esistono altre tecnologie a supporto dell'energia "green", atte a garantire una modalità di viaggio sicura e veloce. Tra queste è possibile elencare:

- *Glowing Highways*: vernice foto-luminescente utilizzata per la segnaletica delle autostrade. Ha la peculiarità di assorbire luce solare durante il giorno per rilasciarla durante la notte. Questa tecnologia permette di avere la segnaletica orizzontale illuminata fino a 10 ore e può essere considerata il migliore sostituto dell'illuminazione stradale tradizionale in un'ottica di risparmio di elettricità.

- *Dynamic Paint*: quando la temperatura scende sotto una certa soglia (0° C), una particolare vernice sensibile alla temperatura mostra dei cristalli di ghiaccio per indicare il percorso corretto al conducente.
- *Rampe*: costituite da un polimero resistente simile a quello dello pneumatico, incorporate nella pavimentazione stradale e sporgenti circa 5 cm sulla stessa. Al passaggio dei veicoli tali rampe vengono temporaneamente spinte in basso. Quando ciò avviene, l'aria presente all'interno viene spinta dentro ad un tubo flessibile e accumulata in un serbatoio. Alla fine del processo l'aria compressa viene utilizzata per alimentare una turbina, generando elettricità.
- *Sensori di luce*: una grande quantità di elettricità viene sprecata per l'illuminazione di strade vuote. Per tale ragione è importante introdurre una soluzione che permetta alle luci di accendersi al passaggio dei veicoli e spegnersi subito dopo. Tale processo, attuabile attraverso apposita sensoristica è sostenibile e permette il risparmio di grandi quantità di elettricità (Kalyani et al., 2015).

Cap.2.3 Le tecnologie applicate alle smart roads

Al fine di scambiare le informazioni provenienti dall'infrastruttura e dai veicoli transitanti, è necessaria l'installazione di un sistema di comunicazione che permetta la raccolta di dati, la trasmissione e l'elaborazione degli stessi. In questo paragrafo verrà approfondito l'aspetto legato alla sensoristica utilizzata nel settore *Smart Roads*, nonché le tecnologie di comunicazione più utilizzate.

Cap.2.3.1 Tecnologie di comunicazione wireless

Le tecnologie di comunicazione wireless possono essere suddivise in due principali categorie: tecnologie wireless tradizionali e tecnologie di comunicazione veicolari (Bilstrup, 2007; Sichitiu and Kihl, 2008). La Fig. 1.4 mostra la classificazione di tali tecnologie.

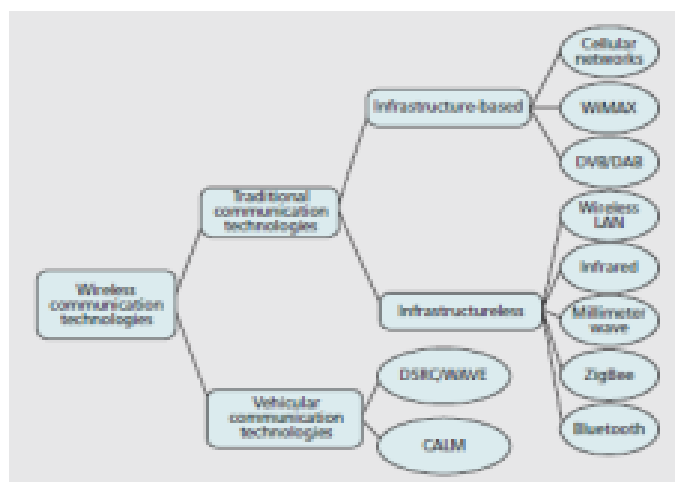


Fig. 1.4. Classificazione delle tecnologie wireless

In accordo con *Dar et al. (2010)* le tecnologie di comunicazione wireless tradizionali sono principalmente divise in: *Infrastructure-based* e *Infrastructureless*. Le prime vengono utilizzate per comunicazioni a lungo raggio, mentre le seconde sono utilizzate per supportare un intervallo massimo di un chilometro. Parlando delle tecnologie *Infrastructure-based*, queste sono equipaggiate con diverse stazioni base per garantire il segnale e coprire un lungo raggio. Le reti cellulari (es. GPRS, EVDO e 3G) sono progettate per lo scambio di dati vocali. Esse hanno una bassa latenza alle spese di una ridotta affidabilità. Spesso, le reti cellulari hanno diverse caratteristiche come l'utilizzo in larga scala e comunicazioni a lungo raggio, tuttavia alcuni aspetti negativi possono essere evidenziati:

- La latenza aumenta quando i dati sono inviati tramite stazioni base piuttosto che con comunicazione V2V o V2I diretta;

- Non sono adatte per il *broadcasting*, poiché supportano la comunicazione punto-punto;
 - L'uso di tecnologia cellulare richiede costi operazionali e contratti con un operatore.
- Nonostante tali inconvenienti, la rete cellulare è utilizzabile per le applicazioni ITS che richiedono un moderato ritardo, comunicazioni a lungo raggio e basso tasso di dati (es. svago e informazioni contestuali).

La tecnologia *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) basata sullo standard IEEE 802.16, è una tecnologia di telecomunicazione finalizzata a fornire dati wireless lungo grandi distanze in diversi modi. WiMAX offre una connettività portatile, alta velocità di trasferimento dati e rappresenta un'alternativa al cavo/DSL. Inoltre questa tecnologia può essere usata in concomitanza con la rete cellulare per incrementare la capacità. Alla stregua della rete cellulare, la WiMAX può essere utilizzata per comunicazioni V2I e I2I a lungo raggio, per fornire, ad esempio, l'accesso Internet ad alta velocità agli utenti mobili.

Cap.2.3.2 Tecnologie per il monitoraggio infrastrutturale

Nel corso della vita di un'infrastruttura, è necessario che vengano garantiti adeguati margini di sicurezza rispetto alle prescrizioni normative. Attraverso il controllo e il monitoraggio in tempo reale dello stato delle infrastrutture, sarà possibile ottenere un'ottimizzazione degli interventi di manutenzione preventiva ed avere un quadro chiaro in caso di criticità, utile per la gestione degli interventi. Si elencano di seguito alcuni dei sensori utilizzati nell'ambito del monitoraggio dell'infrastruttura (*Smart Book, Anas*).

- Il *fessurimetro elettrico* è un sensore utilizzato per il monitoraggio continuo di ponti,

viadotti e fratture negli ammassi rocciosi. Il dispositivo è costituito da un sensore di spostamento di tipo potenziometrico in grado di rilevare le variazioni tra due punti posti a cavallo di una lesione. Il sensore deve essere interfacciabile con qualsivoglia datalogger wireless per il trasferimento dei dati;

- *L'estensimetro* è un sensore che permette di misurare in continuo le deformazioni e gli spostamenti di infrastrutture viarie come ponti, viadotti e gallerie. Il dispositivo deve essere collegato ad un trasduttore elettrico in grado di trasformare ogni movimento meccanico in una variazione di segnale elettrico. Il dispositivo deve essere interfacciabile con qualsivoglia datalogger wireless;

- *L'accelerometro wireless triassiale ULP (Ultra Low Power)* è uno strumento che permette di rilevare e/o misurare l'accelerazione, effettuando il calcolo della forza rilevata rispetto alla massa dell'oggetto (forza per unità di massa). Il sensore è adatto per il monitoraggio continuo di infrastrutture viarie come ponti, viadotti e barriere stradali. Il dispositivo è dotato di trasmissione radio con antenne omnidirezionali con portata wireless massima di circa 200 m;

- *L'assestometro magnetico* è uno strumento che misura l'entità dei cedimenti e/o assestamenti del terreno, più in generale, le variazioni di distanza tra due o più punti lungo un asse verticale comune. Il dispositivo è dotato di una colonna assestometrica dotata di diversi punti di misura (anelli magnetici) la cui posizione, consente di conoscere gli abbassamenti relativi a ciascun tratto compreso tra due anelli e l'abbassamento complessivo rispetto ad un punto di riferimento. Il dispositivo deve essere collegato ad un trasduttore che fornisca in uscita un segnale elettrico e deve essere interfacciabile con un qualsivoglia datalogger wireless;

- *Il sensore di temperatura* è un sensore che misura la temperatura del manto stradale. Il sensore deve essere in grado di fornire un segnale in uscita e deve essere interfacciabile con un qualsivoglia datalogger wireless;

- *Il sensore stato asfalto* è un sensore che misura le caratteristiche fisico chimiche del manto stradale. Esso permette di valutare lo stato della strada al fine di avviare eventuali azioni di pulizia o di prevenzione contro la formazione di ghiaccio o di accumulo di neve/grandine. Il trasduttore deve essere in grado di acquisire varie tipologie di informazioni permettendo, così, di rilevare, oltre la temperatura, anche lo stato del manto stradale, distinguendo tra asciutto, umido, bagnato, ghiaccio, neve, sale residuo, permettendo di valutare anche i valori di umidità critica;

- *La cella di pressione* è un sensore per il rilevamento delle pressioni locali all'interno di una massa di terreno e per il controllo delle pressioni agenti tra un terreno spingente e un'opera di sostegno. Il dispositivo deve poter misurare i sovraccarichi indotti da opere di fondazione e le pressioni all'interfaccia con il terreno. Il dispositivo deve essere collegato ad un trasduttore elettrico che trasforma ogni variazione di pressione in una variazione di segnale elettrico. Il dispositivo deve essere interfacciabile con qualsivoglia datalogger wireless;

- *La cella di carico a trazione* è un sensore per la misura in continuo della tensione delle funi metalliche. Il dispositivo deve essere collegato ad un trasduttore che fornisca in uscita un segnale elettrico e deve essere interfacciabile con qualsivoglia datalogger wireless;

- *Il piezometro elettrico* è dotato di trasduttore di pressione relativo, e consente di determinare l'altezza piezometrica misurando la pressione idrostatica esercitata sul

sensore immerso e di determinare, così, il livello dell'acqua. Il dispositivo deve essere collegato ad un trasduttore che fornisca in uscita un segnale elettrico e deve essere interfacciabile con qualsivoglia datalogger wireless;

- *L'interferometro terrestre* è un sensore dotato di tecnologia radar che permette di misurare da una postazione remota il campo degli spostamenti del terreno attraverso la produzione di immagini georeferenziate e multitemporali, che consentono di seguire l'evoluzione spaziale e temporale del quadro deformativo. Il dispositivo deve essere interfacciabile con qualsivoglia datalogger wireless;

- *Il sensore livello di liquidi* permette di misurare il livello dei liquidi e deve essere costituito da un contenitore e da un galleggiante;

- *Il sensore di prossimità ad ultrasuoni* segnala il superamento della distanza minima di sicurezza dalla barriera stradale. Per il monitoraggio dell'infrastruttura deve essere previsto, inoltre, un software specifico per l'implementazione di un algoritmo dedicato all'elaborazione dei dati raccolti dai sensori ed al rilevamento automatico delle anomalie dell'infrastruttura (deformazioni e fessurazioni significative, presenza di danneggiamenti dovuti a degrado dei materiali e/o ad azioni accidentali), sia in termini di localizzazione del danno, che di stima della sua entità.

Le analisi e le elaborazioni delle misure effettuate devono essere condotte da tecnici con competenza specifica nel campo dell'ingegneria civile. Un tecnico incaricato del monitoraggio strutturale/infrastrutturale dovrà fornire un rapporto sullo stato dell'infrastruttura e sull'eventuale necessità di interventi di riparazione. In ogni caso, il sistema esegue un primo controllo automatico mediante la definizione di soglie di allarme, le quali devono essere definite preventivamente dai tecnici che hanno progettato il sistema

di monitoraggio, in funzione del modello infrastrutturale, del numero di sensori, delle soglie di sicurezza, ecc.

Il superamento delle soglie di allarme deve essere analizzato da un tecnico che deve fornire un report sulle possibili cause e prevedere in maniera proattiva possibili interventi, quali:

- Indagini ulteriori sulla struttura;
- Intensificazione della frequenza di monitoraggio;
- Proposte di intervento.

Inoltre, deve essere previsto un sistema di avviso automatico, che riduca la possibilità di falsi allarmi nell'avvertire i gestori dell'infrastruttura e le Autorità Preposte alla Sicurezza nel caso il sistema dovesse rilevare significative anomalie nella sicurezza della struttura monitorata.

Le analisi provenienti dal monitoraggio strutturale consentono al gestore di sviluppare piani di manutenzione in funzione dei livelli di rischio e delle esigenze di interventi urgenti, ottimizzando, così, le risorse disponibili per la manutenzione.

Cap.2.3.2.1 Tecnologie di self-aware e self-adapt

La funzione di self-aware è quella di utilizzare dispositivi e sensori incorporati o apposti, come sensori capacitativi, sensori vibrazionali, sensori infrarossi e sensori a fibra ottica per monitorare le condizioni dello stato di traffico (*Feng 2011*). Inoltre, le tecnologie di test non distruttive possono essere utilizzate per monitorare le condizioni

strutturali. Come ad esempio, metodi di impatto ecologico, misurazione infrarossi della temperatura, tecnologie GPR e di riconoscimento dell'immagine (Zuo, 2013). Le sottofunzioni consistono in:

- *Tecnologie di Self-aware della pavimentazione*: misurazione di temperatura e umidità, monitoraggio delle condizioni di ghiaccio, individuazione di danneggiamento strutturale (Tab. 1.2);

Funzioni	Tecnologie	Disponibilità	Costi
Rilevazione della temperatura e dell'umidità	Sensori di vibrazione, sensori a fibra ottica e sensori infrarossi, ecc.	Alta	Alti
Monitoraggio condizioni di ghiaccio	Sensori di vibrazione, sensori a fibra ottica e sensori infrarossi, ecc.	Alta	Alti
Individuazione di danneggiamento	oghe di test non distruttive	Alta	Alti

Tab. 1.2. Tecnologie inerenti il self-aware della pavimentazione (*Zhao and Wu, 2015*)

- *Tecnologie di Self-aware del sottofondo e dei versanti:* monitoraggio delle condizioni di gelo e disgelo del sottofondo, monitoraggio della composizione del sottofondo, monitoraggio della stabilità dei versanti (Tab. 1.3);

Funzioni	Tecnologie	Disponibilità	Costi
Monitoraggio delle condizioni di gelo e disgelo del sottosuolo	Rete di sensori di temperatura	Alta	Alti

Monitoraggio della composizione del sottofondo	Sensori di misurazione delle deformazioni,	Media	Medi
Monitoraggio della stabilità dei versanti	Sensori di misurazione delle deformazioni, estensimetri.	Media	Medi

Tab. 1.3. Tecnologie inerenti il self-aware del sottosuolo (*Zhao and Wu, 2015*)

- *Tecnologie di Self-aware dello stato di traffico*: questa funzione mira a individuare e distinguere le informazioni dei veicoli. La deformazione superficiale causata dal passaggio dei veicoli verrà misurata attraverso appositi sensori. I sensori a induzione magnetica possono essere utilizzati per la conta del numero di passaggi di veicoli attraverso l'induzione elettromagnetica (*Sun et al., 2012*). Una volta ottenuti i dati relativi al numero, al peso e alla distribuzione dei veicoli, è possibile analizzare il volume di traffico, la tipologia di veicoli, la distribuzione di percorrenza, e le condizioni di congestione del traffico.

In analogia a quanto fatto per le funzioni di self-aware, anche per le funzioni di self-adapt, *Zhao and Wu (2015)* riportano le principali tecnologie utilizzate nelle differenti aree:

- *Tecnologie di Self-repair*: le pavimentazioni in conglomerato bituminoso e in calcestruzzo, sottoposte ai carichi ripetuti da traffico inevitabilmente si fessureranno. Anche se quelle in calcestruzzo hanno la capacità di auto-ripararsi, una volta che la fessura supera un certo limite, quest'ultima permarrà. Considerando la capacità di autoriparazione di questa categoria di pavimentazioni, le tecnologie sono di due tipi (Tab. 1.4): auto-riscaldamento e micro capsule (*Bhasin et al., 2009; Garcia et al., 2010; Sun et al., 2011*)

Funzioni	Tecnologie	Disponibilità	Costi
Self-repair	Riscaldamento automatico per la velocizzazione di autoriparazione delle pavimentazioni in	Bassa	Medi

	calcestruzzo		
	lascio di micro capsule per il riempimento e la riparazione delle fessure	Bassa	Sconosciuti

Tab. 1.4. Tecnologie inerenti il self-repair (*Zhao and Wu, 2015*)

- *Tecnologie di Self-melt*: la presenza di ghiaccio e neve potrebbe influenzare le prestazioni della pavimentazione. I metodi tradizionali riguardano lo spargere il sale e spalare la neve. Tuttavia, le *Smart Roads* potrebbero provvedere allo scongelamento della pavimentazione automaticamente. L'*heat-melt* è una metodologia fattibile per scongelare il ghiaccio presente sulla pavimentazione ed è conveniente ed efficiente (*Yehia and Tuan, 1999; Ramsey et al., 1999; Zhao and Wu, 2015*). Ci sono tre tipi di tecnologie per il riscaldamento e la fusione (*heat-melt*) della neve sulla pavimentazione (Tab. 1.5).

Funzioni	Tecnologie	Disponibilità	Costi
Self-melt	Utilizzo di cemento conduttivo per il rivestimento della superficie e passaggio di corrente per lo scongelamento di ghiaccio e neve	Alta	Medi

	Utilizzo di cavi di riscaldamento elettrico incorporati	Alta	Medi
	Immagazzinare l'energia solare durante i mesi estivi e rilasciare l'energia durante la stagione invernale per lo scongelamento della pavimentazione	Media	Sconosciuti

Tab. 1.5. Tecnologie inerenti il self-melt (*Zhao and Wu, 2015*)

- *Tecnologie di controllo della temperatura:* includono le funzioni di auto-riscaldamento e auto-raffreddamento e mirano al minimizzare i danni dovuti dalle variazioni di temperatura. Un cappotto termico riflettente capace di riflettere la luce solare potrebbe ridurre la temperatura della pavimentazione. Tuttavia potrebbe influenzare le prestazioni della stessa, ad esempio resistenza e vita utile (*Chen et al., 2012*). Delle tubazioni incorporate possono, inoltre, provvedere all'innalzamento o all'abbassamento della temperatura (a seconda della temperatura del liquido transitante).

- *Tecnologie di drenaggio:* considerando gli eventi alluvionali nelle regioni pluviali, è necessario un costante e rapido drenaggio delle acque. In un sistema *Smart Road* è possibile combinare i drenaggi con elementi di accumulo, in particolare i canali di drenaggio saranno incorporati nella pavimentazione e nel sottosuolo, mentre gli elementi di accumulo nel sottosuolo. In caso di alluvione, l'acqua piovana verrà convogliata nei punti di accumulo attraverso i canali (*Zhao and Wu, 2015*).

- *Tecnologie di pulizia automatica:* hanno l'obiettivo di ridurre l'inquinamento e i gas di

scarico. In accordo agli studi di letteratura, il TiO_2 può essere utilizzato come fotocatalizzatore per accelerare il degrado degli ossidi di azoto dei gas di scarico (Beeldens, 2006). Inoltre le pavimentazioni costituite da cemento con polvere di gomma possono provvedere alla riduzione dell'inquinamento acustico e del rumore nella strada (Cao, 2007). Pertanto, mediante l'inserimento di questi elementi all'interno dei materiali costituenti la pavimentazione, la strada ha la capacità di pulirsi automaticamente dalle fonti di inquinamento, tuttavia le prestazioni della pavimentazione potrebbero essere influenzate.

Cap.2.3.2.2 Monitoraggio del piano viabile

Il monitoraggio del piano viabile è necessario per il controllo delle principali caratteristiche fisico-chimiche del manto stradale e permette di conoscere in tempo reale lo stato della pavimentazione, con il fine di avviare azioni di manutenzione e di prevenzione, ad esempio contro la formazione di ghiaccio o l'accumulo di neve/grandine.

A tal proposito, lungo l'infrastruttura stradale si necessita l'installazione dei seguenti sensori, in maniera distribuita:

- Sensore di temperatura;
- Sensore dello stato asfalto.

Il primo fornirà informazioni sulla temperatura del manto stradale, per segnalare la possibile formazione di ghiaccio. Il secondo provvederà al controllo dello stato del manto stradale (asciutto/bagnato/innevato/ghiacciato).

Cap.2.3.2.3 Monitoraggio delle barriere di sicurezza

L'iniziativa legata alle *Smart Roads* prevede la possibilità di implementare un sistema di sensori posizionati sulle barriere stradali, al fine di rilevare la deformazione e la rottura o il danneggiamento della barriera, nonché l'avvicinamento dei veicoli alla stessa. Tali dispositivi possono, quindi, inviare un segnale di allarme agli operatori dell'Ente Gestore qualora si verifichi un evento incidentale (*Smart Book Anas*).

Pertanto, è previsto lo sviluppo delle seguenti funzionalità attive all'interno delle barriere:

- Comunicazione in tempo reale di un eventuale danneggiamento o rottura della barriera stradale a seguito di urti con mezzi motorizzati, e possibile georeferenziazione dell'evento (carreggiata, direzione e chilometrica);
- Segnalazione di avvicinamento pericoloso di mezzo motorizzato alla barriera stradale attraverso un avviso comunicato all'utente.

I principali sensori utilizzati per il monitoraggio delle barriere di sicurezza sono:

- Accelerometro a shock, per la misura dell'accelerazione e vibrazione derivanti dagli urti alle barriere;
- Sensore di prossimità ad ultrasuoni, per la segnalazione del superamento della distanza minima di sicurezza tra il veicolo e la barriera.

I sensori di accelerazione per la sicurezza del traffico potrebbero essere posizionati direttamente sulle piastre di ancoraggio delle barriere. Il sistema di rilevamento degli urti esegue una misura di accelerazione. Il microcontrollore elabora il modulo dell'accelerazione e lo confronta con un valore soglia, che se superato, attiva lo stato di allerta. Potrebbe essere, inoltre, previsto un sistema che permetta la localizzazione

dell'urto tra due sensori adiacenti. La distanza tra veicolo e barriera, invece, è ottenuta misurando il tempo necessario affinché l'onda a ultrasuoni si rifletta sul veicolo e ritorni al sensore posto sulla barriera. Se la distanza è inferiore ad un valore soglia, variabile a seconda della categoria stradale, viene attivato il sistema di allarme e inviata al dispositivo mobile dell'utente stradale. Un'applicazione futura potrebbe prevedere un sistema di comunicazione tra i sensori di avvicinamento e il veicolo dotato di sistema DSRC, che determinerà un allontanamento automatico del mezzo dalla barriera stradale, evitando, così, la fuoriuscita dalla carreggiata e potenziali incidenti.

Cap.2.3.2.4 Monitoraggio di ponti e viadotti

Il monitoraggio strutturale svolto nella fase di esercizio è un'attività essenziale per la durabilità e la salvaguardia delle infrastrutture come ponti e viadotti, che devono esercitare la loro funzione diverse decine di anni.

Nel caso di strutture datate, il monitoraggio è necessario per la valutazione delle condizioni strutturali e dell'integrità della struttura stessa. Inoltre, consente di mantenere sotto controllo i fenomeni di degrado che si possono sviluppare a seguito di eventi catastrofici o durante la vita della struttura. La comprensione e valutazione di tali fenomeni può costituire un valido aiuto nella corretta definizione degli interventi di manutenzione e ripristino (*Smart Book Anas*).

Il monitoraggio può coinvolgere gli elementi strutturali che compongono il ponte o il viadotto oppure il sottosuolo interessato dalle fondazioni della struttura. Gli elementi più sottoposti a monitoraggio sono:

- Le travi che costituiscono l'impalcato del ponte;
- Le pile e le spalle del ponte;
- Le fondazioni.

I sensori IoT utilizzati sono:

- Fessurimetri o Estensimetri, per la misura delle deformazioni delle travi di impalcato e dei pulvini, movimenti dei giunti o fenomeni di fatica della struttura;
- Accelerometri triassiali, per la misura delle vibrazioni della struttura soggetta al traffico veicolare;
- Inclinatori biassiali o triassiali per monitorare inclinazioni e rotazioni delle pile;
- Assestimetri, per il monitoraggio di cedimenti o spostamenti differenziali delle fondazioni;
- Sensori di temperatura per la misura della temperatura dell'asfalto;
- Celle di pressione, per la misura delle pressioni agenti al contatto tra un'opera di sostegno ed un terreno spingente;
- Inclinatori per il controllo dei movimenti di scivolamento dei terreni; - Piezometri, per il monitoraggio della falda acquifera.

Cap.2.3.2.5 Monitoraggio in galleria

La sicurezza e la gestione delle gallerie esistenti necessitano un monitoraggio continuo, soprattutto in corrispondenza delle sezioni critiche o delle zone già

ammalorate, con il fine di definirne correttamente il comportamento nel tempo. Gli strumenti diagnostici consentono di identificare e localizzare potenziali anomalie, danneggiamenti presenti nella struttura della galleria e generare degli avvisi nel caso di superamento di soglie prefissate.

I sensori da utilizzare per il monitoraggio strutturale del rivestimento della galleria sono i seguenti:

- Accelerometri, per la misura di vibrazioni e cedimenti del rivestimento definitivo della galleria;
- Sensore di temperatura, per monitorare la temperatura del rivestimento della galleria;
- Estensimetri e/o Fessurimetri, per il monitoraggio dei movimenti orizzontali, verticali e convergenze;
- Celle di pressione, per il calcolo delle sollecitazioni e pressioni locali agenti al contatto tra un'opera ed il terreno spingente.

Nelle gallerie di recente realizzazione sono già presenti sensori e impianti tecnologici, come previsto dalla Normativa vigente per la sicurezza in galleria. Tale sensoristica permette la misurazione e il monitoraggio dello stato di funzionamento degli impianti presenti, della viabilità e delle condizioni di traffico in galleria, della temperatura interna della galleria, della velocità dell'aria, nonché delle condizioni di visibilità e di inquinamento dell'aria (*Smart Book Anas*).

Cap.2.3.2.6 Monitoraggio dei versamenti instabili

Per monitorare correttamente la stabilità di un versante occorre avere quanti più dati

possibili per effettuare un'osservazione continua nel tempo del potenziale fenomeno di dissesto (*Smart Book Anas*).

I principali parametri da monitorare sono riportati nel seguente elenco:

- Spostamenti superficiali;
- Stato deformativo del terreno lungo una verticale;
- Profondità e forma della superficie del movimento franoso; - Collocazione spazio-temporale di eventuali movimenti in atto; - Aspetti idrogeologici del sito;
- Regime idraulico ed eventuali sue variazioni.

I sensori che più si prestano per il monitoraggio dei parametri sopra elencati sono:

- Interferometro terrestre;
- Inclinatori;
- Piezometri.

Cap.2.3.3 Sistema di monitoraggio del traffico e trasporti merci

Nelle Smart Roads è previsto il monitoraggio in tempo reale delle condizioni del traffico e del trasporto merci. Si elencano di seguito quelli previsti dallo *Smart Book di Anas*:

- *La Multi-function Smart Camera* svolge l'attività di videosorveglianza "intelligente",

individuando gli eventi pericolosi su strada, rilevando i dati di traffico, le targhe, l'eventuale presenza di nebbia, e le distanze di visibilità;

- *Il sistema Weigh in Motion System* permette di monitorare costantemente il peso di ciascun veicolo che transita su strada grazie all'utilizzo di sensori installati nel manto stradale;

- *Il sistema di controllo degli svincoli* consente, da remoto e in automatico, l'attività di controllo e gestione degli accessi agli svincoli autostradali, mediante l'installazione di barriere automatiche veicolari;

- *Il sistema di Truck Parking* previsto nelle aree di sosta per mezzi pesanti consente di prenotare gli stalli di sosta attraverso un servizio dedicato, garantendo un monitoraggio continuo delle merci, per una maggiore sicurezza;

- *Lo Smart Tracer Road Work* è un dispositivo che consente di segnalare e geolocalizzare la presenza di un cantiere stradale e dispone di GPS, modem Wi-fi e GSM, batteria e led per il segnalamento del punto di inizio e fine del cantiere.

Cap.2.3.4 L'intelligenza artificiale e l'iot a servizio delle smart roads

La comunicazione nelle Smart Roads è garantita, come già detto, dalle diverse tecnologie wireless. Tale sistema di comunicazione gioca un ruolo fondamentale al fine di interconnettere persone, strumenti digitali, veicoli e infrastrutture. Le informazioni vengono raccolte dai sensori e condivise dagli utenti al fine di essere, successivamente, elaborate. Ciascun dispositivo tecnologico dotato di sensori prende parte ad una rete IT e tutti i

dispositivi connessi formano ciò che viene comunemente chiamato *Internet of Things* (IoT). L'insieme di questi dispositivi genera una quantità enorme di dati (Big Data) che rappresentano la linfa vitale di una smart road, e secondo le previsioni, in futuro il loro ruolo sarà sempre più rilevante ai fini della gestione stradale, della sicurezza e della manutenzione (*Pompigna and Mauro, 2021*). Tuttavia, l'enorme mole di dati generati dall'IoT deve essere opportunamente elaborata, filtrata e classificata. A tal proposito, l'intelligenza artificiale (AI) offre algoritmi capaci di dare un senso a questi dati, trasformandoli in risultati predittivi e raccomandazioni prescrittive (*Stracener et al., 2019*). In particolare, l'intelligenza artificiale è un campo dell'informatica che prevede lo sviluppo di macchine intelligenti. L'AI fa sì che una macchina apprenda dalle proprie esperienze, incrementando rapidamente la produttività. Attraverso lo studio dei dati raccolti, è capace di riconoscere modelli e prevedere sviluppi futuri facendo uso di algoritmi dalle elevate capacità di previsione e classificazione. Il Machine Learning (ML), il Deep Learning (DL) e le Reti Neurali vengono ampiamente utilizzate per incrementare la produttività e per programmare adeguate azioni preventive. L'AI rappresenta la base delle infrastrutture smart e prevede diverse applicazioni in tempo reale, quali: aggiornamenti meteo, sistemi di previsione degli incidenti, servizi di emergenza, ecc. Nel caso studio presentato da *Bhogaraju e Korupalli (2020)*, ad esempio, sono stati utilizzati diversi algoritmi di elaborazione dell'immagine per stimare in anticipo la severità delle buche in funzione della loro posizione e del numero di incidenti avvenuti in prossimità delle stesse. Gli algoritmi di elaborazione delle immagini sono, ad oggi, capaci di riconoscere i volti, classificare gli oggetti, riconoscere i modelli, ecc. con l'ausilio di reti neurali, ML e DL. Nel suddetto caso studio, la sensoristica e le telecamere hanno generato una grande mole di dati, questi ultimi sono stati elaborati in primis dall'edge computing e successivamente inviati al cloud,

attraverso dei “fog nodes”, dove i dati sono stati ulteriormente filtrati, al fine di eliminare quelli superflui. Una volta che i dati sono stati elaborati e archiviati nel cloud, le metodologie di Intelligenza Artificiale (in particolare algoritmi Machine Learning e Deep Learning) hanno preso parte al processo di previsione e classificazione degli output sulla base dei dati di input. Tali sistemi sono, quindi, capaci di percepire e rispondere a delle variazioni ambientali, adattandosi alle stesse. Come spiegano *Moyser e Uffer (2016)*, il flusso di informazioni all’interno di un ambiente smart è generalmente unidirezionale; ad esempio, gli utenti ricevono informazioni in tempo reale sulle condizioni di traffico e vengono notificati in caso di emergenza. L’implementazione, all’interno di un ambiente smart dell’elemento “cognitivo” genera, invece, un flusso multidirezionale; gli utenti, non solo ricevono informazioni, ma le inviano a loro volta ad altri dispositivi/sensori, in maniera tale che tali sistemi apprendano e adattino il proprio comportamento. L’approccio cognitivo combina, pertanto, il concetto smart con quello dell’apprendimento (*Psaltoglou, 2018*). Nelle smart roads del prossimo futuro, i veicoli non saranno solo connessi, ma anche a guida autonoma, e per tale ragione prendono il nome di CAVs (Connected and Autonomous Vehicles). L’automazione dei veicoli è un’applicazione concreta dell’intelligenza artificiale (AI) nel campo dei trasporti. Mediante l’utilizzo dei Big Data prodotti dalle smart roads, gli algoritmi AI rendono i calcolatori capaci di svolgere attività per l’uomo, come ad esempio guidare. Da una semplice assistenza alla guida alla completa automazione, in accordo con i cinque livelli di automazione definiti dalla *International Society of Automotive Engineers (2018)*.

Fig. 1.5. Livelli di automazione dei veicoli secondo SAE (*Pompigna and Mauro, 2021*)

I dati provenienti dalle smart roads possono essere utili nella pianificazione urbana e nella



progettazione e gestione delle infrastrutture. L'archiviazione e l'analisi dei Big Data inerenti il traffico potrebbe essere utilizzata dai tecnici per analizzare i flussi in una specifica area e adoperare le soluzioni idonee per gestire la mobilità e prevenire la congestione stradale, mediante l'utilizzo di diverse tecniche di simulazione (ad esempio, macro-, meso-, micro-).

Simili considerazioni possono essere fatte relativamente ai dati inerenti all'infrastruttura e all'ambiente. Infatti, tali informazioni possono essere inserite ed utilizzate all'interno di un modello BIM (Building information Modeling), non solo per la fase di progetto dell'infrastruttura, bensì anche per le operazioni di costruzione, manutenzione e gestione (*Pompigna and Mauro, 2021*).

Cap.2.4 La sicurezza stradale e le smart roads

Alla classica guida ecologica, di cui si è parlato nei paragrafi precedenti, si affianca il concetto di guida eco-safe, che integra alle tecniche della prima (es. adozione di accelerazioni/decelerazioni gradualmente), comportamenti di guida sicuri, come il rispetto dei limiti stradali o il mantenimento delle distanze di sicurezza (*Filho et al., 2012; Vaezipour et al., 2016*). Anche in questo caso l'avanzamento della tecnologia e le nuove interfacce uomo-macchina (HMI) hanno contribuito all'adozione di comportamenti di guida sicura (*Birrell et al., 2014; Park and Kim, 2015*).

La sicurezza stradale che si configura con una riduzione dell'incidentalità e, di conseguenza, della mortalità stradale dovrebbe rappresentare un effetto diretto dell'introduzione della tecnologia ITS e dell'avvento delle Smart Roads. Infatti, il conducente riceverebbe, durante la guida, una serie di informazioni legate alla

mobilità, alle condizioni della pavimentazione, ai limiti di velocità, alla presenza di situazioni di guida pericolose, ecc. Ciò dovrebbe indurre nell'utente una maggiore consapevolezza dell'ambiente circostante in maniera tale da guidarlo nelle scelte ottimali da prendere durante la guida. Diversi studi hanno dimostrato l'impatto positivo dei sistemi in-vehicle su aspetti legati alla sicurezza stradale (*Demmel et al., 2011, Zhang et al., 2016; Xiang et al., 2016*). Alcuni di questi includono una varietà di sistemi di avviso (es. adaptive braking, avvisi di blind-spot), come anche dispositivi più mirati (*vedi Cap.4*). *McElheny et al. (2006)* hanno valutato su strada gli effetti sulla sicurezza di un dispositivo in-vehicle che inviava avvisi inerenti la velocità consigliata in curva. La guida si è svolta nella Virginia Smart Road e ha coinvolto 48 partecipanti. Rispetto alla condizione di controllo, nella quale i conducenti non ricevevano alcuna informazione, nella condizione sperimentale sono stati rilevati tempi di reazione minori e velocità di approccio alla curva più appropriate, probabilmente associati alla presenza degli avvisi on-board. Tuttavia l'attività di guida rappresenta una situazione in cui il conducente deve elaborare una grande mole di informazioni. Ulteriori feedback provenienti dall'ambiente circostante potrebbero sovraccaricare le capacità di elaborazione delle informazioni del conducente, gravando su di esso negativamente. Tale aspetto rappresenta il fulcro di questo lavoro di ricerca e verrà ampiamente trattato nei successivi capitoli. Si è ritenuto necessario, per una migliore comprensione dell'argomento, effettuare in questo capitolo una prima analisi della letteratura, volta ad individuare gli elementi principali che stanno alla base del concetto di "*Smart Road*", nonché le potenzialità che da esso derivano in termini di rinnovamento infrastrutturale, impatto ambientale e sicurezza stradale. Per rendere la trattazione più completa ed esauriente, sono stati approfonditi anche gli aspetti

tecnologici e la sensoristica che caratterizzerà, nel prossimo futuro, la base per la digitalizzazione delle strade. Nei prossimi capitoli verranno trattati gli aspetti operativi che hanno consentito di affrontare questo studio. In particolare, nel seguito verrà approfondito il tema della simulazione di guida, che riveste un'importanza fondamentale ai fini della riproducibilità delle condizioni proposte e, ancor di più, ai fini della sicurezza dei partecipanti alla sperimentazione.

Bibliografia

1. Adwani, A., Madan, K. H., Hande, R. (2015). Smart Highway Systems for Future Cities. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering (IJIRCCE)*, 3 (7), pp. 7292-7298.
2. Aldegheishem, A., Yasmeen, H., Maryam, H., Shah, M. A., Mehmood, A., Alrajeh, N., Song, H. (2018). Smart Road Traffic Accidents Reduction Strategy Based on Intelligent Transportation Systems (TARS). *Sensors*, 18 (7).
3. Badura, S., Lieskovsky, A. (2010). Intelligent Traffic System: Cooperation on MANET and Image Processing. *Integrated Intelligent Computing (ICIIC)*, 2010 First International Conference, pp. 119-123.
4. Barkenbus, J. N. (2010). Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy Policy*, 38 (2), pp. 762-769.

Cap.3 Interazione tra conducente e tecnologia in-vehicle

Uno degli obiettivi dell'ingegneria stradale è quello di garantire il comfort e,

soprattutto, la sicurezza degli utenti impegnati nell'attività di guida. A tal proposito, non è sufficiente che la strada venga progettata secondo la normativa vigente, bensì dovranno essere prese in considerazione ed analizzate tutte le componenti che influenzano l'attività di guida del conducente, modificandone la prestazione. Per una corretta definizione del problema è, quindi, necessario studiare l'interazione tra le diverse componenti che entrano in gioco nel contesto stradale: il conducente, l'ambiente esterno, il veicolo, la strada. Tale aspetto diventa ancora più importante quando al compito principale di guida viene affiancato quello di elaborazione di informazioni aggiuntive provenienti da dispositivi In-Vehicle, sempre più frequenti nei moderni veicoli. Lo sviluppo di tecnologie ITS di assistenza alla guida introduce un'ulteriore variabile al problema della sicurezza stradale, evidenziando maggiormente i limiti rappresentati dallo studio individuale di una singola componente. Nei successivi paragrafi verrà trattato lo stato dell'arte finora raggiunto dagli studi condotti sull'interazione tra il conducente e la tecnologia smart (sistemi in-vehicle, ADAS, ecc.), verranno illustrate le metodologie utilizzate, le misurazioni e gli indicatori ottenuti, evidenziando le potenzialità e i limiti di queste ricerche.

Cap.3.1 Background e avvento degli adas

Negli ultimi decenni la sicurezza è diventata un fattore sempre più importante per l'industria automobilistica. Risultati derivanti da test di sicurezza sui veicoli, come l'Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) forniscono ai clienti informazioni riguardanti la resistenza di ciascun veicolo in fase di collisione, quest'ultima viene chiamata "Sicurezza Passiva". Al giorno d'oggi vengono progettati "Sistemi di Sicurezza Attiva" che assistono il conducente nella prevenzione degli

incidenti (Lingdren and Chen, 2006). Questi sistemi sono anche conosciuti come Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) e sono dispositivi intelligenti installati all'interno del veicolo per supportare il conducente con differenti modalità. Essi possono essere utilizzati per fornire importanti informazioni circa il traffico, la chiusura di strade, i livelli di congestione e i percorsi alternativi. Inoltre, sulla base dei livelli di distrazione e di performance del conducente, tali sistemi possono predisporre avvisi e suggerimenti (Kala, 2016). Quindi, la sicurezza alla guida viene incrementata anche prima che si presentino situazioni critiche (Siemens VDO, 2005). L'obiettivo dei sistemi di assistenza alla guida è quello di ridurre o eliminare gli errori di guida, migliorare la gestione dei flussi di traffico e, di conseguenza, ridurre considerevolmente i costi e l'inquinamento (Brookhuis et al., 2001). Una grande varietà di sistemi di assistenza alla guida è stata installata in un numero crescente di veicoli (Viereckl et al., 2016). Siccome questi dispositivi forniscono informazioni in tempo reale e stanno diventando sempre più sofisticati (e quindi più utili) vi è una crescente preoccupazione circa il fatto che essi possano interferire con l'attività primaria di guida e compromettere la sicurezza stradale.

Cap.3.1.1 Cause di incidente

La sicurezza stradale è, principalmente, associata ai "fattori umani". La compromissione del conducente alla guida è la prima delle cause degli incidenti nelle autostrade europee. Basandoci sulla letteratura, Smiley e Brookhuis (1987) hanno rilevato che il 90% degli incidenti stradali sono attribuibili all'errore umano, causato da fenomeni di fatica, inattenzione e sonnolenza al volante. In accordo con Vallet (1991) la principale causa di incidenti mortali è dovuta alla perdita di vigilanza (34%).

Mentre alcuni suggeriscono che l'alcool è il "fattore causale principale" presente in almeno il 20% di tutti gli incidenti, si stima che il fenomeno della fatica, come "fattore unico", sia responsabile del 7-10% di tutti gli incidenti (Tunbridge et al., 2000). Il costo degli incidenti stradali, per la società, è enorme, sia in termini di perdita di vite umane, sia di perdite economiche. Solo in Europa, 50.000 persone muoiono durante incidenti stradali ogni anno, mentre più di 1.500.000 rimangono feriti. La congestione di traffico, invece crea disagi nei conducenti prevalentemente nelle zone economicamente più sensibili. Tunbridge et al., 2000 mostrano che i fattori prevalenti di incidente risultano essere la perdita del controllo del veicolo e l'impossibilità di evitare un veicolo presente nella carreggiata. La distribuzione dei fattori che contribuiscono è anche interessante. Questi fattori possono essere classificati in base alla causa che li genera: Conducente (errori e degrado della prestazione), Ambiente, e caratteristiche del Veicolo, contribuiscono all'incidente (Shinar, 1998). L'incidenza dell'alcool è stata stimata al 3.8%, che è molto vicina a quella rilevata per gli incidenti in Inghilterra, nei quali era stato appurato che il conducente guidava in stato di ebbrezza (4.2%). Per gli altri fattori correlati la situazione non è così semplice. Il degrado dovuto alla fatica è registrato per lo 0.8% degli incidenti, mentre studi più approfonditi e un largo volume di evidenze mostrano che questo fattore si aggira intorno al 7-10%. Questa sottostima del fattore "fatica" è adesso ben riconosciuto ed è il risultato dell'assenza di evidenze dirette di sonnolenza o stanchezza alla guida. Non vi è una misura quantitativa di quest'effetto nel conducente. Se i conducenti sopravvivono ad un incidente causato dalla sonnolenza non saranno propensi ad ammetterne la causa; viceversa, se non sopravvivono non vi sono spesso delle correlazioni a livello fisiologico per provare tale fattore. Studi più recenti (Rolinson et al, 2018; Parnell et

al., 2018; Hammond et al., 2019; European Road Safety Observatory, 2015; Mannering et al., 2016; Chand et al., 2021) riconducono le principali cause di incidente stradale a cinque fattori chiave: a) human factors (fatica e distrazione); b) condizioni fisiche del veicolo; c) Condizioni di traffico; d) caratteristiche geometriche della strada (tipologia di strada, numero di corsie, ecc.); condizioni metereologiche - pioggia, visibilità ridotta, neve, ecc. In tema di distrazione del conducente, la World Health Organization (WHO, 2020) ha identificato nell'utilizzo del cellulare la maggiore causa. Essi riportano che, l'utilizzo del cellulare e di altri oggetti elettronici durante la guida, aumenta la probabilità di incidente di un fattore pari a quattro. Chand et al., (2019), hanno evidenziato che il 25% degli incidenti stradali che coinvolgono mezzi pesanti e veicoli passeggeri, sono stati causati da distrazione derivante da dispositivi elettronici. Olson et al. (2009), esaminando 203 casi di camionisti distratti, hanno evidenziato che il 71% degli incidenti è associato ai conducenti impegnati in attività non connesse alla guida. Nei successivi paragrafi verrà approfondito il concetto di distrazione del conducente, con particolare focus sulla distrazione visiva, sui meccanismi che la causano e sulle misurazioni adottate per quantificarla. Misurare la distrazione visiva del conducente è uno strumento fondamentale per determinare la sicurezza stradale, quando quest'ultimo interagisce con dispositivi in-vehicle.

Cap.3.1.2 Supporti elettronici alla guida

Le caratteristiche meccaniche del veicolo, come si è detto nel paragrafo precedente, rappresentano uno dei fattori chiave legati alle cause di incidente. Si pensi ad esempio ad un veicolo nel quale non viene effettuata periodicamente la manutenzione o all'assenza dei moderni dispositivi di sicurezza quali, ad esempio, l'assistente di

corsia, il controllo elettronico della stabilità e l'ABS (Cicchino, 2017). La prevenzione e riduzione degli incidenti richiede contromisure ideate per prevenire i comportamenti più nocivi. In Europa, Giappone e USA, gli studiosi hanno combinato approcci ergonomici e ingegneristici sia per la valutazione del rischio, sia per l'indicazione dei limiti di prestazione dei conducenti, sviluppando nuove misure di sicurezza. Ad esempio, Brookhuis e Brown (1992) mostrano che vi è la necessità di un approccio ergonomico, nella forma di supporti elettronici alla guida, per migliorare la sicurezza stradale, i trasporti e la qualità ambientale.

Il miglioramento del comfort del conducente sembra essere un forte stimolo per lo sviluppo di questi dispositivi, almeno dal punto di vista del marketing. A tal proposito, i produttori di automobili investono uno sforzo considerevole per garantire migliori condizioni di comfort. Applicazioni note in tal senso sono i sistemi di navigazione e i sistemi di Advanced Cruise Control (ACC). Prima della commercializzazione, è indispensabile una ricerca sulle necessità dell'utente stradale, ma anche studi sull'accettazione e, soprattutto, sulle ricadute in termini di sicurezza stradale.

Cap.3.1.3 Avvento degli advanced driver assistance systems

Ciò che oggi chiamiamo ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) è l'insieme dei sistemi e sottosistemi che fungono da base per un contesto stradale totalmente automatizzato. Alcune di queste tecnologie sono già disponibili sul mercato, o pronte ad essere commercializzate. Gli ADAS hanno una storia considerevole. In Europa diversi produttori di automobili e istituti di ricerca hanno preso parte all'iniziativa Prometheus, intorno al 1986. Diversi progetti sono stati portati avanti e molti di questi avevano l'obiettivo di risolvere problemi pratici legati al traffico urbano. Poco dopo,

l'Unione Europea ha avviato il programma DRIVE (Dedicated Road Infrastructures for Vehicle safety in Europe), nel quale sono stati affrontati un gran numero di problemi pratici ma, allo stesso tempo, fondamentali. Un esempio di questi è il progetto GIDS (Generic Intelligent Driver Support), il più grande progetto di DRIVE 1, molto avanti per il tempo in cui è stato condotto e ancora rilevante (Michon 1993). L'obiettivo finale di questo progetto era quello di "determinare i requisiti e gli standard di progettazione per una classe di sistemi di guida intelligente adattabile alle richieste di informazione e alle capacità prestazionali del singolo conducente". Da un lato questa classe di sistemi vuole aiutare gli utenti nell'individuazione e valutazione dei pericoli derivanti dalla strada e dal traffico, dall'altra fornire consigli per affrontare pericoli specifici.

Cap.3.1.4 Benefici e funzionalità

Il fine ultimo degli ADAS è quello di ridurre o anche eliminare gli errori di guida, migliorando così l'efficienza. I benefici della loro implementazione sono potenzialmente significativi, sia dal punto di vista umano, sia da quello economico che ambientale (Congress, 1994):

- La sicurezza stradale viene considerevolmente migliorata;
- Molti più veicoli potranno essere ospitati nella sede stradale;
- È possibile realizzare performance di guida elevate;
- I conducenti che utilizzano gli ADAS possono essere considerati sicuri ed efficienti (vedi persone anziane o conducenti alle prime armi).

La funzione primaria degli ADAS è quella di facilitare l'attività di guida fornendo

avvisi real-time, istruzioni e warnings. I sistemi di supporto alla guida possono operare in forma consultiva, semi-automatica o automatica (Nilsson et al., 1991; Rosengren, 1995), e ognuno di essi può avere conseguenze differenti sull'attività di guida, e conseguentemente sulla sicurezza stradale. Sebbene lo scopo dei sistemi di supporto alla guida sia quello di generare un effetto positivo, sono stati rilevati alcuni effetti avversi sul comportamento del conducente, con conseguente degrado in termini di sicurezza (Zwahlen, et al., 1988, Van Winsum, 1997). Da una parte, l'invio di avvisi e informazioni può generare situazioni in cui l'attenzione del conducente si discosta dal traffico. Dall'altra, il fatto che il sistema di supporto assuma parte del compito di guida potrebbe benissimo produrre un adattamento da parte del conducente. Come risultato, o il conducente potrebbe non essere consapevole (o esserlo troppo tardi) di un pericolo improvviso, o non è ancora pronto per un'adeguata risposta. Prima di introdurre qualsiasi sistema di supporto alla guida, devono essere identificate accuratamente conseguenze di tale introduzione. Una specifica fonte di problemi con lo sviluppo di questa tecnologia che mira a ridurre gli incidenti è la grande difficoltà di prevedere i benefici in termini di risparmio di vite e di feriti stradali derivanti dall'introduzione di questi dispositivi.

Cap.3.1.5 Problematiche associate agli adas

Ouwerkerk (1986) in un sondaggio tra gli studi del tempo ha riportato che più della metà dei conducenti professionisti ammetteva di essere stato molto vicino all'incidente a causa del sonno. Questi numeri sono stati ottenuti sia per conducenti di bus che camion. Ad oggi si pensa che il problema legato al ridurre/eliminare gli incidenti sia risolto attraverso l'introduzione degli ADAS. Tuttavia, vi sono anche potenziali

problemi da tenere in considerazione. Per esempio, la maggiore complessità del cockpit aumenta le probabilità di errore da parte del conducente e di almeno uno dei componenti del sistema di guida, sia in riferimento ad errori “spontanei” che di progettazione (Janssen et al., 1992). In tal caso si richiede vigilanza aggiuntiva del conducente, nonostante quest’ultima si stia riducendo come conseguenza dell’automatizzazione del compito di guida (Brookhuis & De Waard, 1993, Brookhuis et al., 2001). I sistemi avanzati di assistenza alla guida sono sistemi progettati al fine di supportare il conducente nel suo compito di guida. Tale supporto può spaziare dalla semplice presentazione di informazioni all’acquisizione del controllo del veicolo in situazioni critiche da parte del sistema. La caratteristica comune di questi ADAS è che essi, a differenza dei sistemi di sicurezza passivi, intervengono direttamente sull’attività di guida (Lindgren & Chen, 2006). A questo proposito, l’accettazione del sistema sembra dipendere dal livello di controllo assegnato al conducente (Nilsson et al., 1991; Bekiaris et al., 1997); molti potenziali utenti considerano un problema l’automatizzazione del compito di guida. A tal proposito, la ricerca mostra che questo tipo di automatizzazione dell’attività di guida può incrementare i tempi di reazione del conducente (Brookhuis et al., 2001). Inoltre è stato riscontrato che gli ADAS influenzano il comportamento alla guida del conducente in termini di velocità adottata, distanze di sicurezza dal veicolo di fronte e frequenza delle manovre di cambio di corsia (Saad, 2004). Una delle più importanti caratteristiche della tecnologia in-vehicle è quella di fornire informazioni ai conducenti. Non solo attraverso messaggi posizionati nell’ambiente stradale, ma anche attraverso l’integrazione degli stessi all’interno del veicolo con l’ausilio di appositi dispositivi. È chiaro che un sistema di supporto alla guida progettato male possa influire negativamente sui differenti attori,

ma anche sui benefici sociali associati al sistema (Bekiaris et al., 1997). Tuttavia, i dispositivi ADAS che si limitano a fornire informazioni sono molto più apprezzati con riguardo all'accettazione degli stessi. Esempi noti sono i sistemi di navigazione, sistemi di avviso code stradali, ACC, sistema di monitoraggio del conducente.

Cap.3.2 Categorie di adas

Gli Advanced Driver Assistance Systems possono essere suddivisi in otto differenti categorie: controllo laterale, controllo longitudinale e avoidance, supporto alla retromarcia e al parcheggio, miglioramenti della visibilità, regolazione intelligente della velocità, monitoraggio del conducente, sistemi pre-crash e sistema di avviso di scarsa aderenza con la pavimentazione stradale (AIDE, 2005).

Cap.3.2.1 Controllo laterale

Gli ADAS associati al controllo della posizione laterale possono essere suddivisi nelle seguenti sottocategorie:

- Lane Departure Warning (LDW): uscire dalla propria corsia può risultare in una perdita del controllo del veicolo e/o in una collisione. Gli studi mostrano che il 55% degli incidenti mortali negli Stati Uniti sono stati causati da uscite non intenzionali dei veicoli dalla propria corsia (Headley, 2005). Tali sistemi usano una camera per riconoscere la segnaletica orizzontale e attivano l'avviso quando il conducente sta per fuoriuscire dalla propria corsia. Il sistema protegge il conducente da cambi di corsia accidentali attraverso un warning visivo. Allo stesso tempo, egli sperimenterà una combinazione di vibrazioni al volante e una leggera correzione automatica per riportare il veicolo nella corsia di partenza (Siemens VDO, 2005). Questo LDW ha

funzioni simmetriche, ovvero può effettuare le misurazioni sia verso destra che verso sinistra. I produttori di autoveicoli sperano che LDW possa aiutare i conducenti ad evitare situazioni pericolose causate da perdita di vigilanza, distrazioni derivanti da cellulare e sonnolenza (Toyota Active Safety, 2005).

- Blind Spot Detection: nel contesto urbano possono sopraggiungere alcune situazioni critiche se vengono trascurati i cosiddetti “punti ciechi”, ovvero quelle porzioni di spazio che il conducente non riesce a visualizzare. Con l’ausilio di una telecamera integrata, il sistema di individuazione dei punti ciechi fornisce al conducente informazioni sulla presenza di eventuali veicoli, ciclisti o pedoni nelle aree non visibili (Siemens VDO, 2005). Quest’informazione viene spesso generata in funzione della differenza di velocità tra il veicolo guidato e gli altri. I produttori di veicoli usano spesso sistemi passivi basati su sensori a infrarossi per individuare oggetti presenti nei punti ciechi. La scelta è giustificata dal minor costo di questi ultimi e dal fatto che i sistemi attivi potrebbero interferire tra di loro risultando meno affidabili (Wang et al., 2005; Raab et al., 2003).

- Lane Change Assistant (LCA): questo sistema lavora insieme al precedente per raccogliere dati inerenti la corsia sulla quale viaggia il veicolo e quella opposta. Il sistema invia un avviso se il conducente rientra nella propria corsia troppo presto a seguito di un sorpasso (Bishop, 2005). Il warning è attivo finché il veicolo si trova nella zona critica. Se il conducente ignora l’avviso e prova a cambiare corsia (con possibili rischi di collisione) viene avvisato attraverso una vibrazione del volante (Siemens VDO, 2005).

Cap.3.2.2 Controllo longitudinale

I sistemi di controllo longitudinale e di avoidance possono essere suddivisi nelle seguenti sottocategorie:

- Adaptive Cruise Control (ACC): è una tecnologia che regola automaticamente la velocità del veicolo al fine di mantenere una corretta distanza di sicurezza da chi sta di fronte nella stessa corsia (Siemens VDO, 2005; BMW, 2005). Ci si aspetta che l'ACC mantenga una corretta distanza di sicurezza anche se il veicolo di fronte frena inaspettatamente. Se, ad esempio, il veicolo di fronte frena o accelera, il sistema, in entrambi i casi, regola la velocità in maniera tale da mantenere una distanza ottimale (Ford, 2005).

- Traffic Jam Assist/Stop & Go: a completamento dell'ACC è progettato per aiutare il conducente in condizioni di traffico intenso. Il sistema prende automaticamente le distanze dal veicolo di fronte a velocità inferiori ai 70 km/h e fa sì che il veicolo si fermi e riparta senza l'intervento del conducente.

- Curve management: questo sistema riduce automaticamente la velocità se il veicolo sta approcciando una curva pericolosa. Il sistema usa delle mappe, sviluppate per applicazioni ADAS, per ottenere i dati sulla curvatura stradale. Assieme all'ACC e a un dispositivo di localizzazione GPS, il sistema fornisce il controllo longitudinale. In accordo con AIDE (2005), ciò si ottiene:

- o Identificando il veicolo sulla mappa
- o Ricostruendo il profilo stradale sul quale viaggia il veicolo
- o Calcolando la curvatura
- o Calcolando la velocità ottimale per viaggiare su una specifica curva
- o Impostando la velocità corretta

- Forward Collision Warning (FCW): sviluppato per evitare il rischio di collisione con un ostacolo posto frontalmente al veicolo. Il sistema usa una tecnologia a sensori che misura la distanza, la posizione angolare e la velocità relativa degli ostacoli. I sensori sono posti nella parte frontale del veicolo e scannerizzano costantemente la strada. Se viene rilevato un ostacolo e se il sistema prevede un rischio, provvede ad inviare un avviso al conducente.

- Electronic Brake Assist (EBA): questo sistema interpreta una pressione rapida del pedale del freno come una situazione di emergenza e completa la frenata, se la pressione applicata dal conducente non era sufficiente.

- Forward Crash Mitigation (FCM): è un sistema più conservativo che provvede alla frenata solo se la probabilità stimata di collisione è vicina al 100%. Il sistema usa avvisi acustici e qualche volta tattili per iniziare ad avvertire il conducente circa una possibile situazione di incidente.

Se il conducente non risponde agli avvisi, il sistema usa la massima pressione di frenata all'ultimo momento e contestualmente mette in tensione le cinture di sicurezza per ridurre la severità della collisione (Bishop, 2005).

- Traffic Sign Recognition: Usando una telecamera del sistema di navigazione vengono fornite al conducente informazioni relative ai limiti di velocità. La velocità viene indicata costantemente al conducente sul display. La telecamera riconosce i segni ad una distanza di 35 metri e confronta le informazioni con quelle del sistema di navigazione per una maggiore affidabilità. Ad esempio, un segnale di 30 km/h in condizioni di scarsa leggibilità potrebbe essere confuso dal sistema con uno di 130 km/h. L'idea che sta alla base di questa tecnologia è quella di migliorare la sicurezza stradale ed evitare gli eccessi di velocità (Siemens VDO, 2005).

Cap.3.2.3 Retromarcia e parcheggio assistito

Pur non essendo oggetto di questo lavoro di ricerca, si danno alcuni cenni anche su queste tecnologie a scopo di completezza. L'obiettivo di questi dispositivi è quello di supportare il conducente quando parcheggia attraverso l'individuazione di ostacoli a bassa velocità. Questi sistemi utilizzano dei sensori frontali e posteriori per individuare ostruzioni e notificare il conducente degli oggetti vicini mentre parcheggia (Toyota, 2005). Queste notifiche vengono spesso fornite attraverso segnali acustici che aumentano/riducono la propria intensità in funzione della distanza dell'ostacolo. Molti di questi sistemi forniscono inoltre indicazione su come eseguire la manovra di parcheggio. Altri eseguono la ricerca di potenziali spazi di parcheggio e ne misurano la larghezza per verificare che sia sufficiente.

Cap.3.2.4 Sistemi di viabilità migliorata

Negli ultimi anni i produttori di veicoli hanno lavorato su sistemi di guida che supportino il conducente in condizioni di visibilità ridotta. Vi sono stati differenti approcci tecnologici nella progettazione di questi sistemi.

- Night Vision: guidare in condizioni notturne può richiedere un grande sforzo e per tale ragione sono stati sviluppati dei sistemi appositi (Siemens VDO, 2005). Questi sistemi usano telecamere e luci infrarosse di prossimità per ispezionare l'area di fronte al veicolo. Una camera posizionata sulla dashboard, quindi, proietta l'immagine sulla parte bassa del parabrezza. Un altro approccio si basa su sensori infrarossi a lungo raggio che permettono al conducente di avere un'immagine chiara anche nella completa oscurità. Il sistema usa una mappa termica dell'ambiente circostante e proietta l'immagine su un

display (AIDE, 2005). Si suppone che il sistema possa ridurre considerevolmente lo stress del conducente dopo ore di guida (Toyota Coming Safety, 2005) e induca in una guida più sicura migliorando la visibilità sia in condizioni notturne che in condizioni meteorologiche particolari (Siemens VDO, 2005).

- Smart Headlamps: contiene nuove funzioni che combinano al veicolo delle sorgenti luminose alogene e a xenon. Questa tecnologia prevede dei fari intelligenti programmati per osservare intorno agli angoli e spegnersi quando viene individuato un veicolo. A quel punto viene regolata automaticamente l'altezza delle luci (Toyota Coming Safety, 2005). Questa tipologia di illuminazione adattiva permette di regolare l'intensità luminosa in funzione della velocità del veicolo.

Cap.3.2.5 Sistemi di monitoraggio del conducente

Questi sistemi permettono di osservare lo stato fisiologico del conducente, ad esempio la stanchezza, il livello di attenzione, i movimenti oculari, il battito cardiaco e identificare i rischi che potrebbero derivare da stati anomali. Situazioni nelle quali la vigilanza del conducente è compromessa e per le quali l'attività di guida non può essere svolta con un livello accettabile di performance vengono incluse nei cosiddetti "deterioramenti dell'attività di guida". Questi possono essere conseguenza di stress, fatica, abuso di alcool o droghe, scarsa attenzione ecc. (AIDE, 2005). Driver Vigilance Monitoring: questo sistema usa sensori che raccolgono informazioni sulla posizione laterale del veicolo e del volante, sul comportamento di guida, sui movimenti della palpebra in maniera tale da poter generare avvisi per il conducente. Ad esempio, la lateral position cambia con uno schema poco razionale o diminuiscono i movimenti della palpebra (AIDE,2005).

Cap.3.2.6 Sistemi pre-crash

Lo scopo di questi sistemi è quello di individuare quando un incidente è inevitabile. Le informazioni fornite da questi sistemi possono essere utilizzate per attivare preventivamente i sistemi di trattenuta di bordo, come cinture di sicurezza e airbag (AIDE, 2005; Merceden Benz, 2005).

- Smart Restraint System: sistemi che individuano l'imminente situazione di pre-collisione e forniscono un avviso preventivo con attivazione degli airbag prima dell'impatto, in maniera tale da ottenere la maggiore protezione delle persone presenti all'interno del veicolo.
- Rear End Collision Avoidance: è un sistema che avverte la presenza e la velocità dei veicoli o di altri oggetti presenti nella corsia di marcia. Questo sistema può essere visto come un'estensione dell'ACC con il vantaggio che esso non sfrutta solo i sensori di controllo longitudinale, bensì anche quelli di mantenimento della carreggiata e sensori di navigazione intelligente. Se l'headway e o il Time-To-Collision (TTC) si trovano al di sotto di un limite preimpostato, il sistema avverte il conducente e, se nessuna azione viene intrapresa, esso attiva i freni per evitare la collisione (AIDE, 2005).
- Rear Collision Warning System: questo sistema è progettato per avvertire inizialmente il conducente della probabilità di incidente imminente e, se necessario, attiva il pretensionamento delle cinture di sicurezza per minimizzare i rischi di lesioni ai danni del conducente.

Cap.3.2.7 Sistemi di avviso inerenti le condizioni della pavimentazione stradale

Questi sistemi utilizzano sia sensori del veicolo che sensori stradali per misurare le condizioni di attrito della pavimentazione stradale. Le informazioni vengono inviate ad un sistema In-Vehicle che usa avvisi visivi o acustici per informare il conducente.

- Anti-Lock Bracking System (ABS): questo sistema è progettato per evitare che le ruote del veicolo si blocchino durante le frenate, soprattutto in condizioni di ghiaccio sulla pavimentazione. Esso utilizza sensori individuali di velocità di rotazione delle ruote al fine di modulare la pressione sul freno e evitare il bloccaggio delle stesse (Toyota Safety Technology, 2005).
- Electronic Brake Force Distribution (EBD): è incluso in alcuni sistemi ABS e ha la funzione di distribuire elettronicamente la pressione idraulica della frenata sugli assi anteriore e posteriore in funzione delle condizioni di guida e del carico del veicolo. L'EBD monitora il carico sui differenti assi e usa il controller ABS per inviare maggiore potenza frenante all'asse con maggior carico. Ciò assicura che gli pneumatici anteriori e posteriori condividano in maniera ottimale il carico frenante in tutte le condizioni, ottenendo così una migliore performance di frenata (Toyota Active Safety, 2005).
- Electronic Traction Control (TCS): è un sistema che impedisce lo slittamento delle ruote motrici durante l'accelerazione. Viene utilizzato un microprocessore per confrontare la velocità rotazionale delle ruote del veicolo. Quando una delle ruote perde trazione, la velocità rotazionale della stessa aumenta velocemente rispetto alle altre. Se ciò accade, l'unità di controllo elettronica fa sì che il motore riduca la potenza in uscita e/o applichi un freno alla specifica ruota. Questo aiuta il conducente a mantenere il controllo del

veicolo durante l'accelerazione su superfici scivolose e aiuta anche i veicoli sportivi nel mantenere la trazione mentre accelerano su pavimentazioni con asfalto ruvido (Toyota Active Safety, 2005).

- Vehicle Stability Control (VSC) è un sistema che usa la tecnologia ABS e del TCS per aiutare il conducente a mantenere il controllo del veicolo durante svolte particolarmente difficili o manovre d'emergenza. Anche in questo caso vi è un microprocessore che confronta la velocità di rotazione delle ruote e angolo di sterzata per decidere se il veicolo ha perso aderenza. Se succede, il microprocessore invia un segnale ai freni e all'acceleratore per aiutare a riprendere il controllo del veicolo e evitare incidenti (Toyota Active Safety, 2005; Ford Accident Avoidance, 2005).
- Downhill Assist Control System (DAC): è installato nei SUV e nei veicoli di grandi dimensioni. Questo sistema è progettato per l'assistenza al freno motore e per aiutare a mantenere il controllo del veicolo durante le fasi di discesa su pendii ripidi o superfici scivolose. Nello specifico consiste in una serie di sensori di velocità delle ruote che determinano le condizioni del manto stradale. Grazie a specifica sensoristica viene determinata la velocità target del veicolo, e se durante una discesa quest'ultimo supera la velocità ottimale, il DAC si attiva e applica una pressione idraulica frenante che riporta la velocità al valore target (Toyota HAD-DAC, 2005).
- Hill Start Assist Control (HAC): questo sistema usa i sensori di velocità delle ruote per evitare che il veicolo retroceda o slitti durante una ripartenza dalla condizione di stop, in fase di salita. Quando il sistema è attivo, l'HAC misura la forza frenante necessaria per ciascuna ruota per aiutare a prevenire il bloccaggio individuale della singola ruota e quindi lo slittamento (Toyota HAD-DAC, 2005).

- Tire Pressure Warning System: usa sensori per la misurazione della velocità rotazionale di una ruota in relazione alle altre. Ciò permette di individuare bassa pressione negli pneumatici. Se vi è uno stato critico di bassa pressione in una o più ruote il sistema notifica il conducente per evitare un'usura non necessaria degli pneumatici (Toyota Coming Safety, 2005).

Cap.3.2.8 Le smart roads come estensione della tecnologia adas

Queste informazioni potrebbero anche, in futuro, essere trasmesse a centri di informazioni sul traffico che forniscono agli utenti e ai gestori stradali importanti comunicazioni sulla manutenzione delle opere stradali (AIDE, 2005). Tale concetto è quello che sta alla base delle Smart Roads e della digitalizzazione delle strade, che utilizzano sistemi avanzati di supporto alla guida (ADAS) integrandoli all'interno dell'infrastruttura stradale, per migliorare l'esperienza di guida degli utenti. Questi sistemi offrono ai conducenti importanti informazioni legate alla strada e al traffico e sono basate sulla tecnologia di comunicazione Vehicle-to-Everything (V2X), che include quella Vehicle-to-Vehicle (V2V) e Vehicle-to-Infrastructure (V2I). La diffusione di veicoli connessi e sempre più automatizzati ha favorito lo sviluppo di queste tecnologie emergenti (Anderson et al., 2014), alle quali verrà affidato il compito di fornire supporto tecnologico per una guida eco-safe (Outay et al., 2019), migliorando, quindi, sia la sostenibilità che la sicurezza dell'intero sistema stradale (Li et al., 2020). Mediante la tecnologia V2V, il sistema può fornire informazioni su traffico, nonché avvisi di sicurezza, aiutando il conducente nell'evitare eventi di congestione e/o collisioni (Zardosht et al., 2017). Con la tecnologia V2I, invece, il veicolo può acquisire informazioni in tempo reale sulla carreggiata, in maniera tale da

affrontare meglio le curve, rispettare i limiti di velocità e prendere decisioni appropriate nelle intersezioni (Anderson et al., 2014). Questo studio considera quindi gli ADAS come lo strumento integrato nel contesto stradale, necessario agli enti gestori per interconnettere veicoli e strada (V2I), veicoli e veicoli (V2V) e veicoli e oggetti (V2X). Nel seguito verrà effettuata una revisione della letteratura esistente per indagare su come i dispositivi in-vehicle impattino sull'attività di guida.

Cap.3.3 Gli studi sull'interazione

I sistemi di informazione sono comuni all'interno dei nuovi veicoli, dai primi sistemi di navigazione satellitare e di infotainment, alle più recenti applicazioni smartphone associate alla guida. L'aumento della potenza di elaborazione degli smartphones, combinata con la loro capacità di comunicazione wireless ha portato a un rapido sviluppo di nuove applicazioni e servizi forniti dalle apps mobili (Araujo et al., 2012). Inizialmente, queste app si sono focalizzate sulla guida "green", sul risparmio di carburante e sulle applicazioni correlate al Global Positioning Satellite (GPS), come i sistemi di navigazione. Tuttavia, recentemente sono emerse sul mercato applicazioni associate alla sicurezza stradale, che offrono al conducente dei feedback su aspetti come la lane departure, l'headway (ovvero la distanza dal veicolo precedente), e la violazione dei limiti di velocità. Il fatto interessante è che, seppur le caratteristiche di questi sistemi ADAS sono sempre state tradizionalmente di dominio del produttore di veicoli, questo aspetto potrebbe presto iniziare a cambiare. Fazeen et al. (2012) hanno suggerito che, poiché i sensori si aggiungono al costo iniziale del veicolo e non potranno essere aggiornati in maniera conveniente, la tecnologia smartphone potrebbe essere utilizzata come alternativa per il supporto alla guida completando le

caratteristiche di sicurezza attiva preesistenti.

Ricerche precedenti hanno mostrato i vantaggi di sistemi in-vehicle basati su tecnologia V2X, finalizzati ad una guida ecologica e sicura (Vaezipour et al., 2018; Vaezipour et al., 2019). Una sperimentazione in ambiente simulato condotta in Australia, ha mostrato che l'utilizzo di dispositivi in-vehicle potrebbe ridurre i consumi di carburante del 6.7%, incrementare il tasso di accelerazioni e decelerazioni gradualmente (rispettivamente del 33% e del 25%), ridurre i tempi di speeding del 50% e, inoltre migliorare l'aspetto legato alla sicurezza, aumentando l'headway del 16.7% (Vaezipour et al., 2018; Vaezipour et al., 2019).

Vi è un gran numero di tecnologie utilizzate, ad oggi, con lo scopo di creare benefici per il conducente. Tuttavia, ciò che ancora non è noto è se questi dispositivi avranno qualsivoglia effetto misurabile sulla performance di guida. Indagare su come i conducenti interagiscono con questi sistemi è la chiave per capire quali fattori vadano considerati ai fini della riduzione delle distrazioni e dei problemi associati al carico di lavoro mentale sperimentato dai conducenti, a dispetto dei benefici che tale tecnologia può arrecare agli stessi (Birrel and Fowkes, 2014). Il problema correlato alla distrazione causata da un task secondario è stato ampiamente ricercato in letteratura e continua ad essere fonte di interesse per gli esponenti politici. Pertanto, investigare sul potenziale impatto di questa tecnologia, ai fini del miglioramento della prestazione di guida, risulta essere un tema di grande rilevanza.

Cap.3.3.1 La tecnologia in-vehicle e il workload mentale

L'introduzione dei dispositivi in-vehicle, porta inevitabilmente a delle ripercussioni su questo indicatore. Infatti, sebbene l'introduzione di un sistema eco-safe comporti

innegabili benefici, esso introduce informazioni aggiuntive che potrebbero portare a valori eccessivi di workload mentale (Li et al., 2020). A tal proposito, sono stati realizzati diversi studi che correlano il workload del conducente con l'interazione tra quest'ultimo e i sistemi in-vehicle. Per esempio, Strayer et al. (2019) hanno confrontato il carico di lavoro mentale associato all'utilizzo di differenti tipologie di sistemi in-vehicle (CarPlay, Android Auto) con quello associato all'utilizzo della strumentazione nativa del veicolo, rilevando, così, livelli di workload inferiori nella prima condizione. Ciò suggerisce che sistemi progettati in maniera adeguata possono indurre minori effetti negativi sul conducente. Graichen et al. (2019) hanno confrontato due tipologie di sistemi in-vehicle, la prima basata sul riconoscimento dei gesti (gesture-based) e la seconda basata sull'interazione manuale (touch-based). I risultati hanno mostrato una maggiore accettazione e minori livelli di workload nella prima condizione. Li et al. (2020), hanno studiato in ambiente simulato le variazioni di workload mentale e di domanda visiva, dovute all'utilizzo di un sistema eco-safe. Le analisi comportamentali hanno mostrato che quest'ultimo potrebbe aiutare i conducenti nell'adozione di accelerazioni e decelerazioni graduali in corrispondenza delle intersezioni. Inoltre, i risultati ottenuti hanno mostrato un incremento del workload mentale, quando ai conducenti venivano trasmesse più informazioni dal dispositivo.

Cap.3.3.2 La distrazione visiva

I problemi correlati alla distrazione derivante da questi dispositivi sono stati studiati approfonditamente nell'ultimo ventennio. La sicurezza alla guida è influenzata dalla presenza di compiti non direttamente associati alla stessa (Jazayeri et al., 2021). La distrazione alla guida è una delle principali cause di incidente (Bowden et al., 2019),

pertanto rappresenta uno dei problemi sostanziali ai fini della sicurezza stradale (Lansdown et al., 2021). Negli Stati Uniti il 9% degli incidenti mortali è stato attribuito alla distrazione dei conducenti (NHTSA, 2019). Inoltre NHTSA (2020) riporta 2841 incidenti mortali associati alla distrazione del conducente nel 2018 negli USA. Lo studio condotto dal National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) su 100 conducenti negli Stati Uniti suggerisce che gran parte degli incidenti - e delle collisioni mancate - sono associati ad un certo grado di distrazione e, più nello specifico, una buona parte di essi è riconducibile all'utilizzo di un sistema in-vehicle (Klauer et al., 2006). I rischi per la sicurezza stradale dovuti a distrazione sono risultati particolarmente elevati per i conducenti giovani per via dell'inesperienza e il considerevole utilizzo delle nuove tecnologie (Lee, 2007; Stutts et al., 2001). In studi effettuati sia al simulatore che su strada, è stato osservato che la distrazione genera aumenti dei tempi di risposta in fase di frenata (D'Addario and Donmez, 2019), riduzione del time to collision (Chen et al., 2018), e maggiore variabilità nel mantenimento della corsia (Engström et al., 2005). Tra le varie forme di distrazione, quella visiva allontana l'attenzione del conducente dalla strada. L'utilizzo del cellulare, ad esempio, rappresenta una delle forme di distrazione più pericolose per i conducenti nel Bahrain (Gazderet al, 2019) ed è causa di un numero crescente di incidenti (Dumitru et al.,2018).

Cap.3.3.2.1 Il canale visivo durante la guida e il rischio derivante dalla distrazione

L'attività di guida è influenzata, in gran parte, dal canale visivo (Kramer & Rohr,

1982; Spence & Ho, 2009), che rappresenta la principale modalità di acquisizione delle informazioni provenienti dal contesto stradale (Bongiorno et al., 2017). Prevedere il comportamento visivo del conducente risulta essere di fondamentale importanza, poiché tale aspetto fornisce informazioni circa la reale percezione dell'ambiente esterno (Bosurgi et al. 2015). Al fine di assicurare un livello accettabile di sicurezza alla guida i conducenti devono, quindi, visualizzare l'ambiente di guida, prestando attenzione a possibili situazioni rischiose. Il processo si realizza attraverso il riconoscimento, da parte del conducente, delle condizioni del veicolo e dell'ambiente circostante attraverso il canale visivo (ma anche uditivo e tattile). L'utente elabora le informazioni così apprese, identifica possibili criticità, decide e pianifica azioni in maniera tale da evitare incidenti. Le distrazioni visive durante la guida rappresentano una grave problematica poiché potrebbero interferire con la fase di riconoscimento, percezione, e con altri processi cognitivi (Ito et al., 2001).

Cap.3.3.2.2 La distrazione visiva durante la guida tradizionale

Esistono diverse forme di distrazione visiva durante la guida. Una di queste si manifesta quando il conducente allontana il proprio sguardo dalla strada per un certo lasso tempo, focalizzandosi su altri target visivi. Tale forma di distrazione sta ricevendo, negli ultimi tempi, molta attenzione per via del rapido sviluppo dei dispositivi ITS (Ito et al., 2001). La distrazione visiva può essere, quindi, definita come una deviazione dell'attenzione del conducente verso attività non necessarie ad una guida sicura; infatti, tale fenomeno genera diversi degni della prestazione di guida, oltre ad incidenti e a mancate collisioni. Tra queste criticità della performance annoveriamo una maggiore variazione della velocità e dell'angolo di sterzata,

maggiori tempi di reazione del conducente, e riduzione dell'headway (Boer et al., 2005; Briggs et al., 2011; Chen and Chiuhsiang, 2011; Engström et al., 2005; Horberry et al., 2006, Kuo et al. 2019). Tuttavia, la distrazione non è sempre motivo di incidente. In genere, il conducente divide le proprie risorse attenzionali tra il compito principale di guida ed eventuali task secondari, con piccole (se non nulle) alterazioni della performance e della sicurezza (Dingus et al., 2016). A tal proposito, i conducenti potrebbero avere fino al 50% di capacità di attenzione aggiuntiva nello svolgimento della guida ordinaria, durante la quale osservano gli immediati dintorni stradali, la vegetazione o pubblicità, ovvero compiti non considerati rilevanti ai fini dell'attività di guida (Hughes and Cole, 1986). Green & Shah (2004) evidenziano che durante l'attività di guida abituale il 40% dell'attenzione potrebbe essere destinata ad attività non associate alla guida. Ciò suggerisce che l'aumento del rischio di incidente potrebbe essere mitigato se le risorse associate ad un'attività secondaria vengono prelevate da questa capacità aggiuntiva del conducente. Il manifestarsi del rischio di incidente è caratterizzato anche dalla presenza contestuale di altri fattori (Angell et al., 2006), quali la percorrenza di un'intersezione, la guida urbana o eventi improvvisi. La concomitanza di questi fattori con lo svolgimento di un'attività secondaria può compromettere le reazioni di un conducente distratto o sovraccaricato, poiché le sue capacità di riserva sono allocate allo svolgimento del task secondario. Svolgere un task visivo secondario in un contesto stradale particolarmente complesso potrebbe compromettere, infatti, le performance del conducente (Bosurgi et al., 2020).

Cap.3.3.2.3 L'impatto dei dispositivi smart sulla distrazione visiva

Con lo sviluppo dei nuovi sistemi di informazione, la capacità addizionale potrebbe

essere presto demandata a questi dispositivi, creando criticità se non correttamente gestita. Alcuni studi riportano che l'utilizzo di questi dispositivi potrebbe creare distrazioni di natura visiva e cognitiva (Oviedo-Trespalacios et al., 2019 a, b). Nel prossimo futuro, con l'avvento delle Smart Roads e della possibilità di comunicazione Vehicle-to-Vehicle (V2V) e Vehicle-to-Infrastructure (V2I), il traffico veicolare verrà modificato mediante l'utilizzo di informazioni in real-time (Fernandez-Isabel et al., 2020) che il conducente riceverà durante la guida. Ci si aspetta che tale assistenza possa migliorare il comportamento di guida del conducente, evitando situazioni critiche (Ali et al., 2020). Sebbene possa sembrare controproducente utilizzare un'altra potenziale fonte di distrazione al fine di migliorare la sicurezza, altri studi suggeriscono, sulla scorta dei dati sugli incidenti provenienti dai database del U.K., che la distrazione del conducente ha un impatto tra il 2% (Birrel e Young , 2011; Mosedale et al., 2011; Stevens & Minton, 2001) e l'8% (Stutts et al., 2001) sugli incidenti, considerando inoltre che il 90% di questi ultimi è il risultato di un inappropriato comportamento di guida (Mosedale et al., 2011). È ben noto, tuttavia, che display visivi e avvisi acustici potrebbero attirare l'attenzione del conducente anche solo in virtù della loro presenza (Kircher et al., 2014). Indagare su come i conducenti interagiscono con questi sistemi durante la guida è la chiave per capire quali fattori vadano considerati ai fini della riduzione delle distrazioni e dei problemi associati al carico di lavoro mentale sperimentato dai conducenti, a dispetto dei benefici che tale tecnologia può arrecare agli stessi (Birrel and Fowkes, 2014). A tal proposito, è necessario quantificare la distrazione visiva.

Cap.3.3.2.4 L'utilizzo dei movimenti oculari per quantificare la distrazione

visiva

Capire come i conducenti interagiscono con questi sistemi è la chiave per minimizzare le distrazioni e i problemi di workload associati, mantenendo chiaramente i benefici per l'utente. Il problema legato alla distrazione è molto difficile da quantificare, perché può assumere diverse forme (visivo, cognitivo, fisico, ecc.). La distrazione visiva, in particolare, avviene quando i conducenti posizionano il proprio sguardo al di fuori della strada per interagire con un dispositivo (Ma et al., 2020). Lo studio dei movimenti oculari dei conducenti può fornire, quindi, un valido aiuto per capire come questi ultimi mobilitano la propria attenzione relativamente alla strada e ai rischi associati (O'Donnell and Eggemeier, 1986; Pellegrino, 2009; Pellegrino, 2012; Bosurgi et al. 2013, Bongiorno et al., 2017, Risteska et al., 2021). Tra i principali indicatori per quantificare la distrazione visiva, è possibile menzionare: numero di fissazioni, tempo medio di fissazione, durata della singola fissazione, ecc. (Gaspar et al., 2016; Li et al., 2018, Ma et al., 2020). Uno dei più efficaci metodi per quantificare la distrazione del conducente è, quindi, quello di misurare l'intervallo di tempo nel quale egli posiziona il proprio sguardo al di fuori dalla strada. Diversi studi hanno dimostrato che le fissazioni fuori strada sono associate ad un maggiore rischio di incidente. In particolare, lunghi periodi di fissazione ($t > 2$ s) sono particolarmente dannosi per la sicurezza stradale (Klauer et al., 2006; Simons-Morton et al., 2014), ma anche fissazioni brevi possono essere causa di incidente (Victor et al., 2015). Le linee guida - "Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices" - della NHTSA (2012) sono state ideate proprio per limitare le potenziali distrazioni associate alle attività non prettamente inerenti la guida. In particolare, si può leggere: "Per tutti i compiti specifici, non associati all'attività di guida (visivi o

manuali), le linee guida NHTSA raccomandano che i dispositivi vengano progettati in maniera tale che i suddetti tasks vengano completati dal conducente senza rimuovere lo sguardo dalla strada per più di 2 s, e che il tempo cumulato dalle fissazioni al di fuori della strada sia comunque inferiore ai 12 s. Se il compito non soddisfa tali criteri, le linee guida raccomandano che il dispositivo venga progettato in maniera tale che non sia possibile per il conducente svolgere il suddetto compito”. Svolgere un task secondario visivo durante la guida porta ad una condivisione delle risorse visive tra le due attività. La domanda associata al compito visivo può essere quantificata attraverso la misurazione dei movimenti oculari, ad esempio con l’ausilio della frequenza delle fissazioni e la durata media delle stesse (ISO 15007-1/15007-2; Victor et al., 2005). L’introduzione di sistemi avanzati di supporto alla guida porterà inevitabilmente l’utente a indirizzare parte delle fissazioni al display durante la guida. Ma, come descritto sopra, ciò potrebbe non rappresentare un problema; a tal proposito le risorse visive in esame non devono essere prelevate dalle attività critiche durante la guida, come ad esempio, guardare gli specchietti, gli strumenti di guida e ancor di più la strada di fronte (Birrel and Fowkes, 2014).

Cap.3.3.2.5 Gli studi effettuati in letteratura

Sono stati effettuati diversi studi, al fine di quantificare l’eventuale grado di distrazione dei conducenti, derivante dall’utilizzo della tecnologia in-vehicle. Quando l’attenzione visiva si allontana dalla strada (per via di un’attività secondaria o dell’occlusione del campo visivo), il conducente peggiora la propria performance (Godthelp et al., 1984). Diversi studi hanno trovato una robusta correlazione tra la distrazione visiva e la ridotta capacità di mantenere la corsia (Greenberg et al., 2003;

Zwahlen et al., 1988). Gli errori di mantenimento della corsia derivanti da una condivisione delle risorse visive vengono spesso corretti con movimenti del volante molto ampi e bruschi rispetto alla guida normale. Tale risultato è confermato dallo studio di Kaber et al. (2012), che riporta un incremento degli errori di sterzata, in presenza di distrazione visiva. Molti studi hanno dimostrato che il carico visivo si traduce in una riduzione della velocità (Antin et al., 1990; Curry et al., 1975; Engstrom et al., 2005). Questo potrebbe essere interpretato come un effetto compensatorio, nel quale il conducente riduce il carico associato all'attività principale per mantenere le performance di guida ad un livello accettabile. È stato dimostrato, inoltre, che i task visivi secondari ostacolano le capacità di discriminazione degli eventi. Per esempio, Olsson (2000) ha trovato effetti significativi del carico visivo sulle prestazioni del Peripheral Detection Task (che misura i tempi di reazione a stimoli visivi, in questo caso dei LED riflessi sul parabrezza). Greenberg et al. (2003) hanno dimostrato che i task di natura visiva, portano ad una ridotta capacità di individuazione degli eventi stradali critici (tali effetti sono stati notati anche per alcune attività di natura cognitiva). Birrel e Fowkes (2014) hanno indagato, nel corso di un esperimento su strada, l'impatto della tecnologia "Foot-LITE Smart Driving System" durante l'attività di guida. Essa ha comportato in media: il 4,3% del tempo di guida osservando il dispositivo, una media di 0,43s per fissazione, senza fissazioni maggiori di 2 s. Questa quantità di risorse visive sembra essere prelevata dalle capacità "aggiuntive" del conducente. Ciò suggerisce che un sistema progettato in maniera ergonomica non causa distrazione visiva per il conducente. Morris et al. (2013) hanno confrontato l'impatto di due diverse tecnologie: a) un dispositivo di navigazione; b) "Foot-LITE Smart Driving System". Le due condizioni sono state, quindi, confrontate

con una guida di controllo. Nel primo caso (a) il tempo di fissazione al di fuori della strada è risultato molto maggiore rispetto alla condizione di controllo (14,3% vs 6,7%), tuttavia pochissime fissazioni hanno superato i 2 secondi. Nel secondo caso (b) i tempi medi di fissazione erano bassi e nessuna di queste ha superato i 2 s. Lo studio ha dimostrato che il dispositivo (b) non generava alcuna distrazione visiva e quindi l'impatto sulla sicurezza non è risultato critico. Starkey et al. (2020) hanno misurato la distrazione derivante da un dispositivo in-vehicle (ISA), durante la guida in ambiente simulato. Il numero di fissazioni al sistema è risultato basso, come anche il tempo medio passato ad osservare il dispositivo, il quale è risultato inferiore al valore limite di 2s previsto dalle linee guida NHTSA (2012). Inoltre, le fissazioni al dispositivo sono risultate più rapide e in numero inferiore, rispetto a quelle indirizzate al tachimetro.

Cap.3.3.3 Cenni sulla distrazione cognitiva

Al giorno d'oggi, con l'avvento delle nuove soluzioni tecnologiche, oltre alle attività di natura visiva, sono aumentati anche i task che richiedono prevalentemente uno sforzo di natura cognitiva. Ciò ha generato un crescente interesse nello studio degli effetti del carico cognitivo durante la guida. Numerosi studi hanno riportato effetti degradanti, in termini di capacità di discriminazione, durante attività associate a carico puramente cognitivo. Questi includono risultati inerenti sia attività di Peripheral Detection Task (Olsson, 2000), sia di individuazione di eventi critici al simulatore (Alm & Nilsson, 1995; Greenberg et al., 2003). Nel caso particolare dei cellulari, una meta-analisi basata su 16 studi condotti da Horrey & Wickens (2004) mostra che i tempi di reazione dei conducenti aumentano significativamente durante la conversazione telefonica. In

tal contesto, non sembra esserci differenza tra sistemi “hands-held” e “hands-free” (Patten et al., 2004). Recarte e Nunes (2003), hanno realizzato uno studio su strada in cui i partecipanti, a bordo di un veicolo strumentato, svolgevano diversi task cognitivi durante la guida. Lo svolgimento di queste attività ha causato un incremento delle dimensioni della pupilla - indicatore di un contestuale aumento di workload - e una concentrazione spaziale dello sguardo. Anche l'ispezione degli specchietti e del tachimetro si è ridotta. I task in cui i conducenti dovevano apprendere informazioni sono risultati facili rispetto a quelli di “produzione”. Infatti, i primi non hanno influenzato la concentrazione spaziale dello sguardo, la dimensione della pupilla e/o l'ispezione degli specchietti e del tachimetro. Le attività di “produzione” (a differenza di quelle di “informazione”), e le conversazioni complesse (sia telefoniche che con un passeggero) potrebbero essere considerate pericolose per la sicurezza stradale. Risultati simili sono stati ottenuti anche da Harbluk and Noy (2002), che hanno investigato gli effetti di attività al cellulare di differente complessità. È stato rilevato che il numero di saccadi e la percentuale di tempo passato a fissare la parte centrale della strada aumentano all'aumentare della difficoltà dei task. In generale, i risultati esistenti mostrano che il carico cognitivo ha un effetto piccolo, se non nullo, nella capacità di mantenimento della corsia. Nelle meta- analisi di Horrey & Wickens (2004), 12 dei 16 studi includono la misurazione di questo dato. Di questi, cinque studi riportano un degrado del mantenimento della corsia associato alla conversazione telefonica. Tuttavia, due di questi studi (Serafin et al., 1993; Siebert et al., 2002) includono una componente visiva associata al task. Uno studio misura solo l'attività del volante (Rakauskas et al., 2004), e uno studio (Alm & Nilsson, 1994) mostra un effetto sulla lane position media ma non sulla variabilità. Ciò, può essere interpretato come una

compensazione del margine di sicurezza piuttosto che del controllo laterale. L'unico studio, incluso in questa meta-analisi, che mostra un degrado del controllo laterale è quello di Strayer e Johnston (2001), che mostrano un incremento degli errori durante un task di produzione verbale (che intende simulare una conversazione telefonica). Un altro studio ha dimostrato un aumento della capacità di mantenimento della corsia (riduzione della deviazione standard della lane position) durante una conversazione telefonica (Brookhuis et al., 1991). Tale risultato è in linea con lo studio di Engstrom et al. (2005). Rakauskas et al. (2004) hanno evidenziato effetti del carico cognitivo sull'attività del volante. Effetti simili sono stati ottenuti da Boer (2000) che ha dimostrato che l'entropia del volante (una misura del disordine dei movimenti dello sterzo) aumenta durante carichi di natura cognitiva. Patten et al. (2004) hanno identificato una significativa differenza tra la velocità media in condizioni "hand-held" e "hands-free. Gli autori ipotizzano che quando il cellulare viene tenuto in mano, rispetto alla condizione di mani libere, i conducenti sono più consapevoli del pericolo e riducono la velocità per mantenere un livello di rischio accettabile. Harbluk et al. (2007) hanno condotto un esperimento su strada, in cui i conducenti svolgevano compiti cognitivi in modalità vivavoce durante la guida. In questo studio sono stati valutati il controllo del veicolo e il comportamento visivo. Le tre condizioni presentate ai conducenti sono: task facile, task difficile, nessun task. Sono state notate differenze significative tra la condizione in cui il conducente non doveva eseguire alcun task e la condizione in cui il task sottoposto era difficile. In particolare, in quest'ultima casistica, i conducenti dedicavano più tempo a guardare il centro della strada e meno tempo a guardare le aree periferiche. In questa condizione, veniva prestata minore attenzione

agli specchietti e agli strumenti di guida. Inoltre, in corrispondenza delle intersezioni, quando veniva presentato il task difficile, si riducevano le fissazioni rivolte al semaforo, rispetto alla condizione in cui il task non era presente. Anche il controllo del veicolo è stato influenzato dalla difficoltà del compito; durante i task difficili si sono verificate maggiori eventi di frenate brusche.

Cap.3.3.4 Differenze prestazionali durante la distrazione visiva e cognitiva

Engstrom et al. (2005) hanno valutato gli effetti del carico cognitivo e visivo in un ambiente reale e simulato. Per modulare le due tipologie di carico sperimentate dai conducenti, gli autori hanno utilizzato due task secondari: rispettivamente un “Arrow Task” e un “Auditory Continuous Memory Task (ACMT)” con diversi livelli di difficoltà. I risultati di questo studio mostrano che gli effetti dei due tipi di carico sono molto diversi tra loro. Un aumento del carico visivo porta alla riduzione della velocità e all'aumento della variazione nel mantenimento della corsia e del numero di sterzate. Il compito visivo porta, inoltre, ad un aumento della conduttanza cutanea durante le sperimentazioni, sia al simulatore che su strada. L'aumento del carico cognitivo, invece, non ha comportato una riduzione della velocità ma una maggiore concentrazione dello sguardo verso il centro della strada. Inoltre, contrariamente alle aspettative, il task uditivo ha portato a miglioramenti delle prestazioni di mantenimento della corsia (riduzione della variazione della posizione laterale), in linea con lo studio di Brookhuis et al. (1991), anche se, la maggior parte degli studi esistenti sul carico cognitivo non ha riscontrato alcun effetto sulla variazione del mantenimento della corsia (Horrey & Wickens, 2004). Gli effetti comuni per entrambi i compiti (visivo e cognitivo) sono: la riduzione delle prestazioni di guida e l'impatto sullo stato

fisiologico degli utenti. Inoltre, entrambi i task hanno aumentato l'attività del volante. In generale, i risultati ottenuti nel simulatore statico, in quello dinamico, e su strada sono stati coerenti. Kaber et al. (2012) hanno realizzato un esperimento su simulatore per valutare gli effetti della distrazione visiva e cognitiva, sia sul livello di controllo operativo (accelerazione e frenata) che su quello tattico (manovra). I partecipanti hanno guidato eseguendo dei task di car-following e di sorpasso, sperimentando quattro contesti di distrazione: nessuna distrazione, distrazione visiva, distrazione cognitiva, entrambe le distrazioni. I risultati hanno mostrato valori di workload più elevati per l'attività di sorpasso rispetto a quella di car-following. Quando i conducenti venivano sottoposti ad entrambe le distrazioni (visiva e cognitiva) commettevano un numero maggiore di errori di guida. Durante l'attività di sorpasso, i partecipanti hanno ridotto le risposte inerenti le attività secondarie, a causa dell'aumento del workload. La distrazione visiva ha comportato un numero maggiore di fissazioni al di fuori della strada (poiché venivano indirizzate al dispositivo di bordo) e all'aumento del carico di lavoro mentale del conducente. È possibile notare un meccanismo di adattamento del conducente, infatti, quando distratto visivamente, quest'ultimo tende a mantenere valori di headway più elevati. Come nel caso della distrazione visiva, anche quella cognitiva ha comportato un aumento del workload, seppur abbia causato un numero minore di errori di sterzata, rispetto alla prima. I risultati hanno mostrato che il controllo tattico ha prodotto un incremento di workload maggiore rispetto a quello operativo. È possibile sostenere, quindi, che entrambe le tipologie di carico (visivo e cognitivo) portino ad un incremento del workload. Tuttavia questi ultimi agiscono sulle performance di guida in maniera differente.

Cap.3.4 Interazione e smart roads: i limiti della letteratura

Come già visto, precedenti studi hanno indagato sull'interazione tra il conducente e le diverse tecnologie di assistenza alla guida (o i cellulari). Alcuni di questi hanno posto l'attenzione sulla variazione del comportamento visivo del conducente, altri sull'alterazione della performance di guida registrata, altri ancora hanno valutato l'impatto di tali sistemi sul workload mentale. A tal proposito, sebbene alcuni ricercatori abbiano utilizzato diversi indicatori per analizzare il workload mentale del conducente, molti di questi studi erano correlati allo svolgimento di task secondari: cognitivi, acustici, aritmetici, conversazioni telefoniche (Benedetto et al., 2014; Li et al., 2018, 2020; Oviedo-Trespalacios et al., 2016). Pertanto, rimane ancora, in gran parte, sconosciuto come il carico di lavoro mentale sia influenzato dalle informazioni provenienti da un dispositivo in-vehicle, e come la domanda visiva venga assegnata rispetto all'attività di guida e all'ambiente stradale. Seppur siano stati delineati i principali effetti provocati dall'interazione uomo-dispositivo, le misurazioni finora indagate in contesti separati, potrebbero fornire un quadro parziale e/o frammentario in merito alle effettive ricadute in termini di sicurezza stradale, soprattutto nell'ottica dell'introduzione di avvisi specifici associati alle Smart Roads. Infatti, per avere una visione completa del problema, bisognerebbe, attraverso una metodologia ad-hoc, integrare differenti tipologie di misurazioni (misure soggettive, misure di performance, misure fisiologiche), nonché riferire queste ultime alla specifica tecnologia oggetto di indagine (navigazione satellitare, collision avoidance, guida green, ecc.), piuttosto che a task secondari che potrebbero provocare ricadute totalmente differenti.

Bibliografia

1. AIDE. (2005). Review and Taxonomy of IVIS/ADAS applications (IST-1-507674- IP).
Ananova. (2006). Car Drives Itself. www.ananova.com/news/story/sm_1680513.html
2. Ali, Y., Sharma, A., Haque, M. M., Zheng, Z., Saifuzzaman, M. (2020). The impact of the connected environment on driving behavior and safety: A driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 144.
3. Alm, H., Nilsson, L. (1994). Changes in driver behaviour as a function of handsfree mobile phones—a simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 26 (4), pp. 441-451.
4. Alm, H., Nilsson, L. (1995). The effects of a mobile telephone task on driver behaviour in a car following situation. *Accident Analysis and Prevention*, 27 (5), pp.707-715.
5. Anderson, J. M., Nidhi, K., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., Oluwatola, O. A. (2014). *Autonomous Vehicle Technology: a Guide for Policymakers*: Rand Corporation.
6. Angell, L., Auflick, J., Austria, P., Kochhar, D., Tijerina, L., Biever, W., et al. (2006). *Driver workload metrics project: Task 2 final report*. Crash Avoidance Metrics Partnership (CAMP), Farmington Hills, MI, Report No.: DOT HS 810 635.
7. Antin, J. F., Dingus, T. A., Hulse, M. C., Wierwille, W. W. (1990). An evaluation of the effectiveness of an automobile moving-map navigation display. *International Journal*

of Man–Machine Studies, 33 (5), pp. 581-594. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(05\)80054-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(05)80054-9)

8. Araujo, R., Igreja, A., de Castro, R., Araujo, R. (2012). Driving Coach: A smartphone application to evaluate driving efficient patterns. IEEE Intell. Veh. Symp., pp. 1005.

CONCLUSIONI

La sicurezza stradale, come risulta da questa ricerca è una materia molto complessa, dove tanti attori devono prendere consapevolezza del proprio potenziale e rischi se questo non dovesse accedere. Con questa ricerca si è voluto distinguere la sicurezza attiva dalla sicurezza passiva, toccando i punti cardine. Abbiamo visto come primo punto “*Gli Ammaloramenti stradali*”, entrando nel dettaglio, rappresentano molto, nel pensiero comune dell’automobilista, una cosa semplice da riparare, ma così non è ed è stato per l'appunto largamente analizzato.

Le Smart Roads rappresentano il futuro delle infrastrutture stradali e della mobilità. Sulla base dello stato dell’arte, è possibile presumere che la digitalizzazione delle strade comporterà notevoli vantaggi per la sicurezza stradale, nella gestione dei flussi di traffico, nonché un miglioramento generale della percezione delle infrastrutture stradali da parte degli utenti, in termini di funzionalità e comfort, e una riduzione dell’impatto ambientale. Contestualmente, l’avvento delle Smart Roads richiederà l’implementazione di nuove tecnologie ITS, al fine di garantire diverse forme di comunicazione tra veicolo e strada (V2I) e tra veicolo e veicolo (V2V). A tal proposito, è lecito domandarsi se la presenza di un’unità di bordo all’interno del veicolo, che trasmette warnings visivi e/o acustici, possa alterare il comportamento e la strategia di guida dello stesso. In particolare, un’eccessiva mole di informazioni

durante la guida potrebbe causare un degrado delle prestazioni del conducente non previsto e non voluto, con ripercussioni sulla sicurezza stradale.

Lo scopo che ci si è posti, con il presente lavoro di ricerca, è quello di dare una risposta, quanto più esaustiva a tale interrogativo, nella quale è presente la classica segnaletica verticale, con la condizione di guida smart, nella quale i segnali vengono riprodotti on-board. I risultati ottenuti forniscono un'ampia descrizione degli effetti generati dalla tecnologia smart sul comportamento di guida del conducente. Si è ritenuto che per trattare un argomento talmente complesso, come quello della componente umana alla guida, fosse necessario eseguire un raffronto tra diverse tipologie di misurazione (soggettive, fisiologiche e prestazionali), in maniera tale da ottenere una trattazione quanto più completa del problema in esame. Inoltre, ai fini della scelta degli avvisi da visualizzare sull'unità di bordo, ci si è affidati alla letteratura esistente, nonché allo Smart Book di Anas, per garantire che il dispositivo perseguisse le medesime finalità di un'unità asservita alle smart roads. Pertanto, il conducente veniva allertato durante la guida in merito al superamento dei limiti imposti, all'eccessivo inquinamento ambientale, e/o alla presenza di criticità opportunamente modellate all'interno del tracciato. In merito alle misurazioni soggettive, i conducenti hanno apprezzato la presenza dell'unità di bordo, confermandone l'utilità ai fini della riduzione dei fenomeni di speeding e del miglioramento della sicurezza stradale. Inoltre, il NASA-TLX ha rivelato valori di workload inferiori nella condizione smart. Tale riduzione è legata ad una maggiore consapevolezza dell'ambiente stradale, che permette al conducente di reagire in anticipo ad eventi esterni, potenzialmente pericolosi.

In merito alle misurazioni fisiologiche, relativamente alla strategia visuale durante

l'approccio ad una curva, sembra che nella guida tradizionale il conducente necessiti di individuare in anticipo un punto di riferimento stabile da osservare (il ciglio interno), effetto riscontrabile anche con la riduzione del raggio di curvatura, come conseguenza di una percezione di guida più complessa. Invece, durante la percorrenza delle curve in condizioni smart, si riscontrano tempi di osservazione del ciglio interno superiori. Ciò potrebbe essere riferibile alla presenza degli avvisi, che come gli oggetti dinamici causano un'elongazione dei tempi di fissazione, o ad un cattivo posizionamento dell'unità di bordo, che potrebbe aver reso più difficoltosa l'individuazione di un punto stabile.

In merito alle misure di performance, sono state indagate sia le prestazioni legate al task primario (il controllo longitudinale e laterale, le violazioni del codice stradale e le misure di efficienza legate ai consumi di carburante e alle emissioni di CO₂), che quelle legate al task secondario (il DVA e la mancata osservazione della segnaletica stradale).

Il conducente, durante la guida smart, tende ad avere in media: un migliore controllo longitudinale del veicolo, come risultato di una riduzione delle velocità e dei valori di accelerazione longitudinale; un migliore controllo laterale del veicolo, riscontrabile dalla riduzione dei valori di lane position, degli angoli e delle velocità di sterzata; una riduzione drastica dei tempi di speeding; una riduzione dei consumi di carburante e delle emissioni di CO₂, il cui valore cumulato sull'intero tracciato risulta essere quasi la metà del valore registrato durante la guida tradizionale. Inoltre, in prossimità del cantiere stradale il conducente, supportato dall'unità di bordo, tende ad effettuare con anticipo il cambio di corsia e a rispettare i limiti di velocità imposti. Nella percorrenza della curva pericolosa, la consapevolezza generata dagli avvisi on-board ha migliorato

drasticamente il controllo laterale del veicolo, con valori degli angoli e delle velocità di sterzata molto ridotti rispetto alla condizione di guida tradizionale. In condizioni di controllo - sia in prossimità del cantiere che della curva pericolosa - si riscontravano delle repentine riduzioni di velocità, risultato di decelerazioni brusche e improvvise. Tale comportamento ha subito, in media, un miglioramento in condizione smart, dove si registrano profili di velocità più regolari: il conducente tende a frenare in anticipo e con velocità ridotte nel primo istante di decelerazione. Ciò è dovuto alla maggiore consapevolezza delle criticità presenti nel tracciato e ad una minore perdita di informazioni rispetto alla guida tradizionale, nella quale quasi la metà dei segnali, in media, non viene osservata. Grazie alla presenza del dispositivo di bordo, i valori di DVA crescono e nessun segnale on-board viene perso. Come risultato di una corretta informazione, il conducente reagisce in anticipo, evitando manovre scorrette e/o potenzialmente pericolose.

Sulla base dei risultati ottenuti si può ritenere che l'unità di bordo, così come concepita in questo studio, non generi fenomeni di degrado della prestazione di guida. Si registrano, invece, significative migliorie, sia dal punto di vista della sicurezza stradale che da quello dell'impatto ambientale. La validità di questo risultato è supportata dal raffronto di un gran numero di misurazioni che, alla fine, conducono ad una valutazione positiva delle smart roads e del loro impatto sul conducente.

Tuttavia, sebbene tale conclusione risulti sicuramente vera nelle condizioni presentate in questa sede, potrebbe non esserlo in condizioni totalmente differenti. Studi precedenti, infatti, associano ad un aumento del carico visivo, un contestuale incremento dei valori di workload, un degrado della lane position e della gestione dei movimenti del volante associati al superamento delle capacità del conducente. Tali

aspetti non sono stati riscontrati in questo studio, pertanto si presume che le risorse associate all'attività di ispezione del dispositivo on-board siano state prelevate da capacità addizionali che il conducente non utilizza (o utilizza per attività non correlate al task primario) in condizioni di guida tradizionale. Tuttavia, il manifestarsi del rischio di incidente è caratterizzato anche dalla presenza contestuale di altri fattori. Bisognerebbe verificare che l'assegnazione di queste capacità aggiuntive per l'ispezione dell'unità di bordo non comprometta la risposta del conducente in presenza di eventi improvvisi concomitanti che potrebbero verificarsi, ad esempio, in un contesto urbano, dove la complessità di guida è superiore. Infatti, una diversa frequenza e/o modalità di riproduzione degli avvisi, un diverso posizionamento/dimensionamento dell'unità di bordo, una differente geometria del tracciato e/o la presenza di elevati flussi di traffico, sono solo alcuni dei fattori che potrebbero alterare tali conclusioni, e rappresentano degli interessanti spunti per sviluppi futuri.

Sulla base di quanto detto, la metodologia presentata in questo studio, sebbene non generalizzabile a tutte le condizioni di guida, ha permesso di delineare un passo importante per lo studio preventivo di situazioni di guida complesse, come quella delle smart roads, valutando con sufficiente anticipo le possibili ed eventuali ricadute negative sulla prestazione di guida ed evitando di esporre inutilmente i conducenti a condizioni pericolose. Inoltre, i risultati ottenuti in termini di impatto ambientale sono promettenti e meritano sicuramente un approfondimento, essendo la salvaguardia dell'ambiente uno dei temi cardine dei nostri giorni.

Tale studio rappresenta, altresì, un grande supporto per enti gestori stradali che, attraverso un'analisi preventiva, possono correttamente indirizzare le proprie risorse

finanziarie, calibrando e ottimizzando i propri servizi. Seguendo tale approccio sarà possibile implementare correttamente questa nuova tecnologia, garantendo un'elevata qualità dei servizi per l'utente stradale, una maggiore sicurezza, un minore impatto ambientale ed una rinnovata percezione delle infrastrutture stradali.