

Sistemi di monitoraggio dei carichi di traffico per l'analisi dello stato delle pavimentazioni stradali



Politecnico di Torino

Relatori:

Ezio Santagata

Davide Dalmazzo

Candidato:

Michele Rifici

Indice

Introduzione.....	10
Cap. 1 AMMALORAMENTI DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI.....	11
Cap. 1.1 Classificazione degli ammaloramenti delle pavimentazioni flessibili.....	12
Cap. 1.2 Problemi della pavimentazione.....	13
1.2.1. Fessurazione a ragnatela (alligator cracking).....	14
1.2.2. Fessurazione a blocchi (block cracking).....	16
1.2.3. Fessurazione di bordo (Edge cracking).....	17
1.2.4. Fessurazione longitudinale e trasversale (Longitudinal and transverse cracking).....	18
1.2.5. Fessurazione di richiamo (Joint Reflection Cracking):.....	20
1.2.6. Fessurazione da scorrimento (slippage cracking).....	22
1.2.7. Risalti e sacche (bumps and sags).....	23
1.2.8. Ormaiamento (rutting).....	24
1.2.9. Ondulazioni (corrugations).....	26
1.2.10. Depressioni (depressions).....	27
1.2.11. Buche (potholes).....	28
1.2.12. Rigonfiamenti (swell).....	30
1.2.13. Scalinamento tra corsia e banchina (lane/shoulder drop-off).....	30
1.2.14. Spostamento del manto per spinta orizzontale (Shoving).....	31
1.2.15. Essudazione di bitume (bleeding).....	33
1.2.16. Levigatura dell'aggregato (polished aggregate).....	34
1.2.17. Scagliatura della superficie (raveling).....	35
1.2.18. Rappezzi (patching-utility cut patching).....	37
1.2.20. Attraversamento binari (railroad crossing).....	39
Bibliografia.....	39
Cap. 2 Analisi procedurale degli interventi di riparazione.....	40

Cap. 2.1 Il rilievo dei dissesti e il calcolo indici di stato.....	42
Cap. 2.2 Programmazione delle tecniche di intervento nella manutenzione.....	47
Cap. 2.3 Possibili risoluzioni dei problemi.....	49
2.3.1. Fessurazione a ragnatela (alligator cracking).....	49
2.3.2. Fessurazione a blocchi (block cracking), di bordo, longitudinale o trasversale.....	50
2.3.3. Fessurazione di richiamo (Joint Reflection Cracking):.....	50
2.3.4. Fessurazione da scorrimento (slippage cracking).....	51
2.3.5. Ormaiamento (rutting).....	51
2.3.6. Ondulazioni (corrugations).....	51
2.3.7. Depressioni (depressions).....	51
2.3.8. Buche (potholes).....	51
2.3.9. Essudazione di bitume (bleeding).....	52
2.3.10. Levigatura dell'aggregato (polished aggregate).....	52
2.3.11. Scagliatura della superficie (raveling).....	52
2.3.12. Rappezzi (patching-utility cut patching).....	53
2.3.13. Essudazione di acqua e pompaggio (water bleeding and pump).....	53
Bibliografia.....	53
Cap. 3 Introduzione ai sistemi WIM.....	54
Cap. 3.1 Cos'è un sistema Weigh In Motion (WIM).....	55
Cap. 3.2 Sistemi di pesatura a piastra.....	63
3.2.1 Sensori capacitivi.....	63
3.2.2 Bending plates.....	64
3.2.3 Sensori a celle di carico.....	67
Cap. 3.3 Sistemi di pesatura con sensori a barra.....	68
3.3.1 Sensori al quarzo.....	71
3.3.2 Sensori a fibra ottica.....	73

Cap. 3.4 Sistemi a ponte B-W.I.M.....	75
3.4.1 Multi-sensor W.I.M.....	77
Cap. 3.5 Sistemi di pesatura portatili.....	77
3.5.1 Sensori piezoelettrici.....	78
3.5.2 Sensori capacitivi.....	78
3.5.3 Bridge W.I.M.....	79
Cap. 3.6 Sistemi W.I.M. con sensori basati su tecnologia in fibra ottica.....	79
3.6.1 Sensore di pressione dinamico in fibra ottica basato sull'interferometro di Michelson...80	
Cap. 3.7 Vantaggi e svantaggi delle fibre ottiche.....	80
Cap. 3.8 Installazione e messa in opera.....	80
Cap. 3.9 Accuratezza.....	84
Cap. 3.10 Modalità di rilevamento e gestione dati.....	86
3.10.1 Il campionamento spaziale.....	86
3.10.2 Il campionamento temporale.....	87
Cap. 3.11 Mercato delle tecnologie per il monitoraggio del traffico.....	88
Cap. 3.12 Studi e ricerche sulle caratteristiche dei sistemi W.I.M.....	89
Cap. 3.13 Stato dell'arte delle soluzioni di ricezione e trasmissione dati raccolti dal sistema W.I.M.	91
Cap. 3.14 Architettura a BUS (Basic Utility System).....	92
Cap. 3.15 Wireless Sensor Network.....	92
Cap. 3.16 Nodo Sensore (mote).....	93
Cap. 3.17 IOT (Internet Of Things).....	94
Cap. 3.18 Raccolta, analisi e uso dei dati.....	94
Cap. 3.19 Dati aggregati (per periodo di tempo):.....	97
Cap. 3.20 Stato dell'arte in Europa ed in Italia.....	101
Cap. 3.21 Valutazione dell'impatto architettonico e ambientale dei differenti sistemi W.I.M....	105

Cap. 3.22 Modifica del comportamento del trasportatore.....	106
Cap. 3.23 Protezione delle infrastrutture.....	107
Cap. 3.24 Sicurezza stradale.....	107
Cap. 3.25 Controllo del traffico.....	107
Cap. 3.26 Pianificazione dei trasporti.....	107
Bibliografia.....	108
Cap. 4 Un nuovo modello per la progettazione.....	110
Cap. 4.1 L'approccio degli spettri di carico – casi di studio.....	113
Bibliografia.....	122
Conclusioni.....	122

Indice delle figure

Figura 1.....	14
Figura 2.....	14
Figura 3.....	16
Figura 4.....	16
Figura 5.....	17
Figura 6.....	17
Figura 7.....	18
Figura 8.....	18
Figura 9.....	20
Figura 10.....	20
Figura 11.....	21
Figura 12.....	22
Figura 13.....	22
Figura 14.....	24
Figura 15.....	24

Figura 16.....	26
Figura 17.....	27
Figura 18.....	27
Figura 19.....	28
Figura 20.....	28
Figura 21.....	30
Figura 22.....	30
Figura 23.....	30
Figura 24.....	30
Figura 25.....	31
Figura 26.....	31
Figura 27.....	33
Figura 28.....	33
Figura 29.....	34
Figura 30.....	34
Figura 31.....	35
Figura 32.....	35
Figura 33.....	37
Figura 34.....	37
Figura 35.....	38
Figura 36.....	38
Figura 37.....	39
Figura 38.....	39
Figura 39.....	40
Figura 40.....	42
Figura 41.....	46

Figura 42.....	47
Figura 43.....	48
Figura 44.....	49
Figura 45.....	61
Figura 46.....	61
Figura 47.....	62
Figura 48.....	63
Figura 49.....	64
Figura 50.....	64
Figura 51.....	65
Figura 52.....	66
Figura 53.....	67
Figura 54.....	68
Figura 55.....	69
Figura 56.....	71
Figura 57.....	72
Figura 58.....	73
Figura 59.....	74
Figura 60.....	74
Figura 61.....	75
Figura 62.....	76
Figura 63.....	76
Figura 64.....	83
Figura 65.....	84
Figura 66.....	89
Figura 67.....	90

Figura 68.....	91
Figura 69.....	93
Figura 70.....	94
Figura 71.....	98
Figura 72.....	102
Figura 73.....	102
Figura 74.....	105
Figura 75.....	112
Figura 76.....	114
Figura 77.....	116
Figura 78.....	117
Figura 79.....	117
Figura 80.....	118
Figura 81.....	118
Figura 82.....	118
Figura 83.....	120
Figura 84.....	120
Figura 85.....	121
Figura 86.....	121

Indice delle tabelle

Tabella 1. gradi di severità per fessurazione a ragnatela.....	15
Tabella 2. gradi di severità per fessurazione a blocchi.....	17
Tabella 3. gradi di severità per fessurazione di bordo.....	18
Tabella 4. gradi di severità per fessurazione di bordo.....	20
Tabella 5. Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione di richiamo.....	22
Tabella 6. Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione da scorrimento.....	23

Tabella 7. Pavimentazioni stradali flessibili – Risalti e sacche.....	24
Tabella 8. Pavimentazioni stradali flessibili – Ormaiamento.....	25
Tabella 9. Pavimentazioni stradali flessibili – Ondulazioni.....	26
Tabella 10. Pavimentazioni stradali flessibili – Depressioni.....	28
Tabella 11. Grado di severità di una buca.....	29
Tabella 12. Pavimentazioni stradali flessibili – Buche.....	29
Tabella 13. Pavimentazioni stradali flessibili – Scalinamento tra corsia e banchina.....	31
Tabella 14. Pavimentazioni stradali flessibili – Spostamento del manto per spinta orizzontale.....	32
Tabella 15. Pavimentazioni stradali flessibili – Spostamento del manto per spinta orizzontale.....	34
Tabella 16. Pavimentazioni stradali flessibili – Scagliatura della superficie.....	36
Tabella 17. Pavimentazioni stradali flessibili – Rappezzi.....	38
Tabella 18. Pavimentazioni stradali flessibili – Attraversamento binari.....	39
Tabella 19.....	44
Tabella 20.....	45
Tabella 21.....	45
Tabella 22.....	45
Tabella 23.....	59
Tabella 24.....	81
Tabella 25.....	82
Tabella 26.....	85
Tabella 27.....	85
Tabella 28.....	86
Tabella 29.....	88
Tabella 30.....	98
Tabella 31.....	104
Tabella 32.....	105

Tabella 33.....	111
Tabella 34.....	115
Tabella 35.....	115

Introduzione

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

Queste miscele sono molto utilizzate nel modo delle pavimentazioni stradali grazie alla loro diversità di caratteristiche ottenute differenziando la granulometria degli inerti, così come anche la qualità e quantità di bitume, ottenendo una vasta gamma di miscele che permette di avere proprietà diverse per rispondere ad esigenze diverse (ad esempio in termini di rugosità, di regolarità o di impermeabilità).

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

Esistono inoltre oggi miscele drenanti, che permettono l'assorbimento dell'acqua delle precipitazioni grazie al tasso di vuoti in esse presenti; l'acqua in questi casi viene assorbita scorrendo all'interno dello strato drenante.

Avendo queste proprietà, questo tipo di conglomerati permette ottime caratteristiche di aderenza, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, riducendo o eliminando del tutto il grave problema dell'acquaplaning, come anche il sollevamento di acqua da parte dei veicoli, che rappresenta potenzialmente un rischio per la visibilità.

Le prestazioni meccaniche di tali miscele vengono soddisfatte tramite l'utilizzo di leganti modificati. Un'altra importante caratteristica dei conglomerati drenanti è quella di garantire anche un buon livello di fono-assorbenza.

Tra tutti i tipi di conglomerati bituminosi presenti in letteratura, diversi sono oggi quelli riciclati. Il riutilizzo di materiali già impiegati nelle pavimentazioni stradali è

difatti usanza che sta diventando preponderante in caso di manutenzione, specie per quel che riguarda quelle flessibili, soprattutto per ragioni economiche e di rispetto ambientale.

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; alcuni di essi sono certamente causati dagli agenti atmosferici, e dalle condizioni climatiche, a cui le pavimentazioni sono sottoposte nel tempo; tuttavia oggi è noto come un forte impatto su di esse viene proprio dai carichi (generati dai veicoli che vi transitano), ed in maniera particolare da quelli che superano determinati valori, i quali generano accorciamenti considerevoli della vita utile della pavimentazione.

Per ovviare a questo problema, di vasta scala e costoso sotto molteplici punti di vista, si cerca di quantificare in maniera sempre più capillare e precisa i carichi dei mezzi che attraversano le strade di tutto il mondo. Uno dei sistemi più innovativi in grado di fare ciò è quello dei WIM.

Vedremo come da questi dati sono stati ricavati dati molto utili riguardo la condizione in cui versano le pavimentazioni esaminate, e come si possa valutare con precisione l'incidenza dei sovraccarichi sulla diminuzione della vita utile delle infrastrutture.

Cap. 1 Degradò delle pavimentazioni stradali

Parliamo 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 della pavimentazioni della rete stradale svolge un ruolo fondamentale per definire un adeguato iter per la manutenzione in caso di danneggiamento.

Lo stato di ammaloramento delle pavimentazioni si può etichettare come:

- funzionale, quando la struttura funziona ancora, e tuttavia l'aderenza o la regolarità sono in uno stato per cui il transito dei mezzi è incerto e poco confortevole;
- strutturale, quando sulla rete si possono notare rotture generate dalla ripetizione delle sollecitazioni del traffico.

Cap. 1.1 Classificazione degli ammaloramenti delle pavimentazioni flessibili

Possiamo distinguere tutti i tipo di difetti nelle seguenti tipologie:

- fessurazioni;
- deformazioni superficiali di origine plasto-viscosa;
- difetti della superficie;
- altro.

Qui di seguito vengono citate 20 categorie di danno, trattate in "Pavement Management for airports, roads and parking lots" di M.Y. Shain, e in "Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys", di FAA – AC 150/5380-6.

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 (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. Rattoppi (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. 1.2 Problemi della pavimentazione

Analizziamo singolarmente i vari tipi di problemi:

1.2.1. Fessurazione a ragnatela



Figura 1



Figura 2

fig. 1 e 2. esempi di fessurazione a ragnatela

Una serie di fessure interconnesse (fig. 1 e 2) causate dalla rottura per fatica della superficie in seguito a continue sollecitazioni dei mezzi in transito. Iniziano a formarsi alla base del conglomerato, poiché lì la tensione di trazione generata 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 dagli angoli acuti a molti lati, che si sviluppano in uno schema che ricorda il dorso di un alligatore o di un cocodrillo. Tale degrado in genere è presente insieme al 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

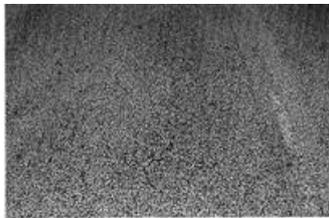
inadeguata (la pavimentazione è stata progettata troppo sottile per i carichi previsti), costruzione scadente (compattazione inadeguata).

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.1)

“Basso – Fessure scarsamente collegate e non frastagliate.

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

Alto – Fessure 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

Tabella 1. gradi di severità per fessurazione a ragnatela

1.2.2. Fessurazione a blocchi



Figura 3



Figura 4

fig. 3 e 4. esempi di fessurazione a blocchi

Fessure interconnesse (fig. 3 e 4) 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. Vengono generate in seguito al ritiro della miscela bituminosa per via della differenza di temperatura che si viene a creare ciclicamente (di solito per invecchiamento del legante o per scarsa scelta dello stesso in fase di mix design). Non sono influenzate dai carichi dei veicoli, e infatti è possibile notarle anche su sezioni non interessate dal traffico.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.2)

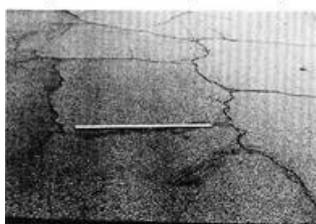
“Basso – Fessure non sigillate, con apertura inferiore a 10 mm; Fessure sigillate in buone condizioni.

Medio –Apertura delle fessure compresa tra 10 mm e 75 mm; le fessure sono comunque circondate da altre minori, e disposte disordinatamente.

Alto – Fessure non sigillate, con apertura maggiore di 75 mm; le fessure sigillate sono circondate da altre, 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

Tabella 2. gradi di severità per fessurazione a blocchi

1.2.3. Fessurazione di bordo



Figura 5



Figura 6

fig. 5 e 6. esempi di fessurazione di bordo

Questo tipo di fessure (fig. 5 e 6) hanno una forma curva, e si sviluppano ai lati della pavimentazione, in genere in una fascia che occupa i 60 cm. Sono provocate dal gelo nello strato del sottofondo, ed il fenomeno è acuito dall'azione dei mezzi in transito.

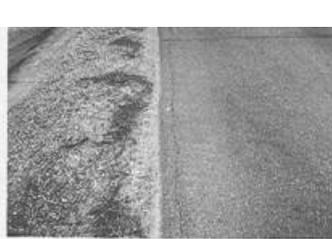
Grado di severità⁽¹⁾ (tab.3)

“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

Tabella 3. gradi di severità per fessurazione di bordo

1.2.4. Fessurazione longitudinale e trasversale



Figura 7



Figura 8

fig. 7 e 8. esempi di fessurazione longitudinale e trasversale

Le fessurazioni longitudinali si sviluppano parallelamente all'asse longitudinale della pavimentazione (fig. 7 e 8); solitamente rappresentano un tipo di fessurazione da fatica.

Tali fessure sono dovute generalmente a cattiva costruzione o posizionamento del giunto (i giunti sono aree meno dense della 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, oppure a causa dell'escursione termica giornaliera.

Quelle trasversali invece sono crepe perpendicolari alla linea centrale, o alla direzione di posa; sono solitamente fratture di tipo termico.

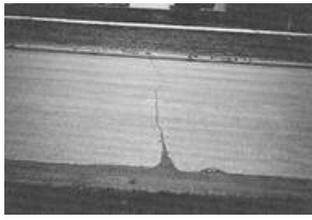
Vengono generate dal ritiro superficiale della miscela bituminosa in seguito all'esposizione alle basse temperature o all'indurimento del legante bituminoso, oppure crepe riflesse causate da crepe sotto lo strato superficiale

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.4)

“Basso – Spessore delle fessure non sigillate minore di 10 mm , con fessure sigillate in buone condizioni.

Medio – Fessure non sigillate con spessore compreso tra 10 mm e 75 mm e le fessure, di qualunque spessore, circondate da altre fessure piccole e disposte disordinatamente.

Alto – Fessure circondate da fessurazione a ragnatela di severità media o alta e fessure non sigillate con spessore superiore a 75 mm.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione di bordo

Tabella 4. gradi di severità per fessurazione di bordo

1.2.5. Fessurazione di richiamo



Figura 9

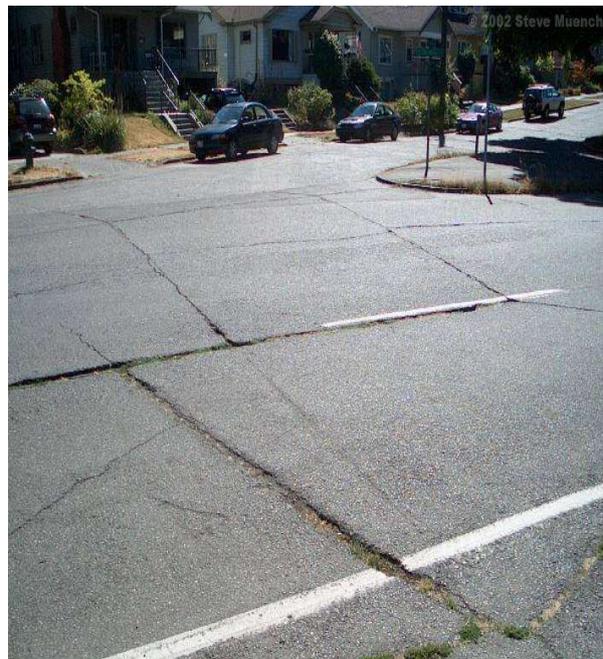


Figura 10

fig. 9 e 10. esempi di fessurazione di richiamo

E' possibile trovare questa tipologia di danno (fig.9 e 10) esclusivamente in caso di pavimentazioni miste (lastre di cemento sotto uno strato di conglomerato bituminoso); le crepe si verificano direttamente sopra i giunti rigidi della pavimentazione sottostante e vengono prodotte dal movimento della soletta rigida

della pavimentazione sotto la superficie flessibile in seguito a variazioni termiche e di umidità. La sollecitazione dovuta al traffico può accelerare il deterioramento. Poichè queste sollecitazioni generano un effetto di taglio, essi influenzano una propagazione in direzione orizzontale delle fessure, con possibile separazione dei due strati di cemento e conglomerato (fig.11).

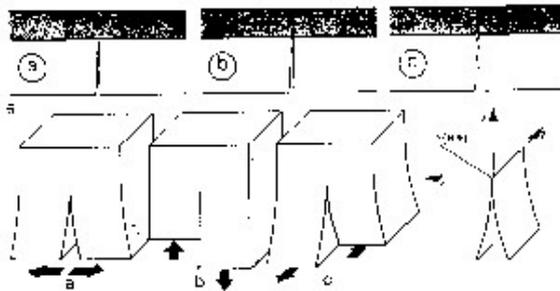


Figura 11

fig.11. Movimenti di apertura delle lesioni in uno strato in conglomerato bituminoso

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.5)

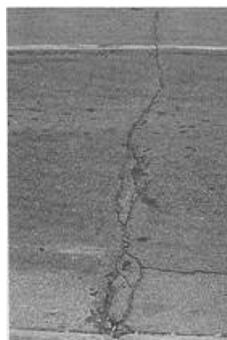
“Basso – Spessore delle fessure non sigillate minore di 10 mm e le fessure sigillate in buone condizioni.

Medio – Fessure non sigillate con spessore compreso tra 10 mm e 75 mm e le fessure circondate da altre più piccole, e disposte disordinatamente.

Alto – Fessure circondate da fessurazione a ragnatela di severità media o alta, e quelle non sigillate con spessore superiore a 75 mm.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 5. Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione di richiamo

1.2.6. Fessurazione da scorrimento



Figura 12



Figura 13

fig. 12 e 13. esempi di fessurazione da scorrimento

Queste fessure (fig.12 e 13), 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 per via di miscele superficiali a bassa resistenza o di uno scarso legame tra lo strato superficiale e il successivo strato sottostante nella struttura della pavimentazione. In genere troviamo queste lesioni nelle curve, in presenza di intersezioni, oppure dove ci sono forti pendenze.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.6)

“Basso – Spessore della fessura inferiore a 10 mm.

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

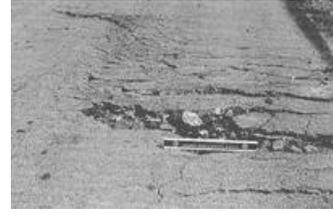
Alto – Spessore maggiore di 38 mm; l’area limitrofa è divisa in frammenti facilmente rimovibili.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

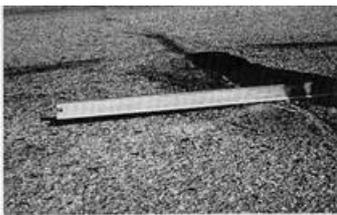
Tabella 6. Pavimentazioni stradali flessibili – Fessurazione da scorrimento

1.2.7. Risalti e sacche

Nel primo caso si tratta di piccoli dossi sulla superficie; hanno origine per instabilità della pavimentazione, per la presenza di acqua che ghiaccia, o per infiltrazione di materiale organico tra le crepe. Nel caso di sacche invece, queste sono avvallamenti della pavimentazione.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.7)

“Distinguiamo grado di severità basso, medio ed alto, a seconda della perdita di qualità di marcia. Tale perdita viene riferita ad una soglia stabilita mediante prove di percorrenza della strada.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 7. Pavimentazioni stradali flessibili – Risalti e sacche

1.2.8. Ormaiamento (rutting)

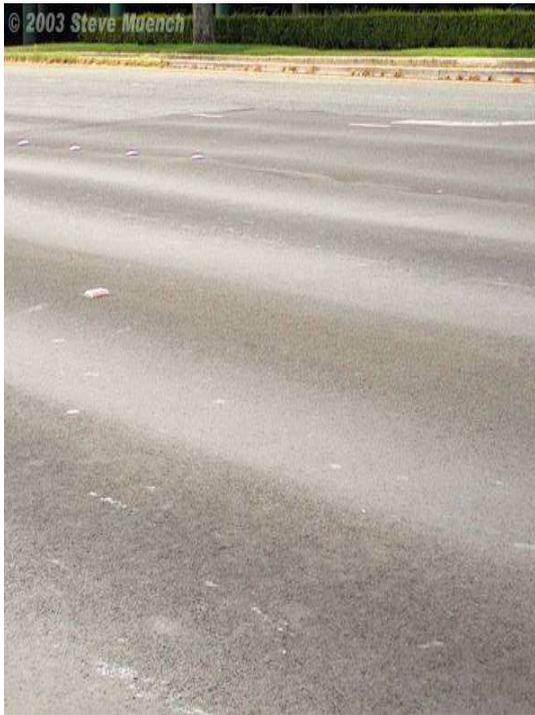


Figura 14



Figura 15

fig. 14 e 15. esempi di ormaiamento

Le ormaie (fig. 14 e 15) sono avvallamenti superficiali nella carreggiata che si creano sulle traiettorie dei mezzi in transito; particolarmente evidenti in seguito alle precipitazioni per via del ristagno di acqua.

Esistono due tipi fondamentali di solchi: misti e sottostanti. Il solco misto si verifica quando il sottofondo non presenta solchi, a differenza di quanto accade in superficie, per via 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, è possibile un sollevamento della pavimentazione nella zona delle ormaie.

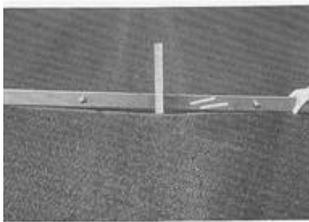
I solchi, pieni d'acqua a seguito di piogge, possono causare l'aquaplaning del veicolo, oppure possono essere pericolosi perché tendono a far sterzare il veicolo quando li attraversa.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.8)

“Basso – Profondità dell'ormai a inferiore a 13 mm.

Medio – Profondità dell'ormai compresa tra 13 mm e 25 mm.

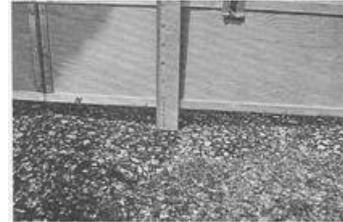
Alto – Profondità dell'ormai maggiore di 25 mm.



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 8. Pavimentazioni stradali flessibili – Ormaiamento

1.2.9. Ondulazioni



Figura 16

fig. 16. esempio di ondulazioni

Le ondulazioni (fig.16) sono rappresentate da una serie di valli e creste che si susseguono sulla superficie della pavimentazione con passo regolare, generalmente inferiore ai 3 metri. Le distorsioni si dispongono trasversalmente al flusso di transito

veicolare. Vengono prodotte dalle sollecitazioni dei mezzi 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⁽¹⁾ (tab.9)

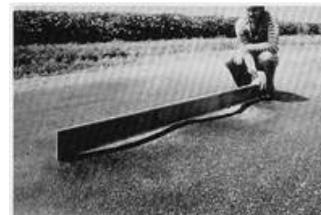
“Distinguiamo grado di severità basso, medio e alto, in base alla perdita di qualità della marcia.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 9. Pavimentazioni stradali flessibili – Ondulazioni

1.2.10. Depressioni



Figura 17



Figura 18

fig. 17 e 18. esempi di depressioni

Le depressioni (fig. 17 e 18) sono delle aree della strada che presentano un'altezza lievemente inferiore delle zone limitrofe. Le depressioni risultano evidenti dopo una

pioggia, quando si riempiono d'acqua. Alcune delle ragioni che le provocano sono cedimenti del sottofondo (ad esempio per via della realizzazione di manufatti nelle zone limitrofe) oppure da errori nella compattazione durante le operazioni di costruzione.

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

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.10)

“Massima profondità delle depressioni:

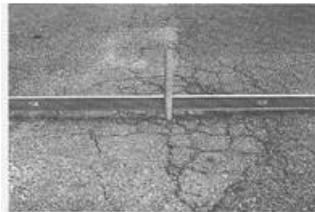
Basso – compresa tra 13 mm e 25 mm.

Medio – compresa tra 25 mm e 50 mm.

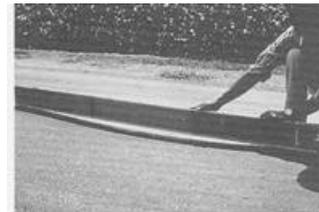
Alto – maggiore di 50 mm.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 10. Pavimentazioni stradali flessibili – Depressioni

1.2.11. Buche



Figura 19



Figura 20

fig. 19 e 20. esempi di buche

Le buche (fig. 19 e 20) sono uno dei tipi più noti di danni; hanno forme circolari, in genere con diametri minori al metro. Si trovano in superficie, ma penetrano fino allo strato di base. I bordi sono generalmente precisi, con i lati a parete verticale. In presenza di acqua, a seguito di precipitazioni, la loro espansione può essere amplificata. In genere, queste rappresentano il risultato finale della rottura per fatica, si creano per asportazione di parte del materiale di conglomerato bituminoso a seguito del continuo passaggio dei veicoli; il degrado prosegue per assenza di manutenzione, a causa di errori nella compattazione degli strati inferiori, o anche per lo sviluppo eccessivo di fessurazioni a ragnatela.

Possono derivare gravi danni al veicolo se questo passa sopra le buche a velocità elevate.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.12)

“Per definire i livelli di severità si analizzano diametro e profondità della buca, come indicato nella tabella seguente (tab.11).”

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

Tabella 11. Grado di severità di una buca



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 12. Pavimentazioni stradali flessibili – Buche

1.2.12. Rigonfiamenti



Figura 21



Figura 22

fig. 21 e 22. esempi di rigonfiamenti

I rigonfiamenti (fig. 21 e 22) rappresentano una elevazione del manto stradale, ed interessano solitamente più di 3 m. Sono prodotti da fenomeni di gelo negli strati inferiori, e sono accompagnati in genere da fessurazioni di scorrimento.

Grado di severità⁽¹⁾

“Distinguiamo grado di severità basso, medio ed alto, in rapporto alla perdita di qualità di marcia. Riguardo al grado inferiore, a volte risulta difficile identificarlo; può essere individuato percorrendo la tratta di interesse alla velocità limite.”

1.2.13. Scalinamento



Figura 23



Figura 24

fig. 23 e 24. esempi di scalinamento

Discrepanza di altezza fra la superficie che percorrono i mezzi e la linea esterna della banchina (fig. 23 e 24); a volte si può osservare anche una differenza tra corsie dovuta ad irregolarità nella fase di realizzazione della pavimentazione. In genere però la causa è da riferirsi allo sgretolamento della banchina.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.13)

“Basso – Dislivello compreso tra 25 mm e 50 mm.

Medio – Dislivello compreso tra 50 mm e 100 mm.

Alto – Dislivello maggiore di 100 mm.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 13. Pavimentazioni stradali flessibili – Scalinamento tra corsia e banchina

1.2.14. Spostamento del manto per spinta orizzontale



Figura 25



Figura 26

fig. 25 e 26. esempi di spostamento per spinta orizzontale

Si tratta di una deformazione longitudinale (fig. 25 e 26), che si sviluppa in aree limitate della pavimentazione, generalmente dove la miscela è a contatto con un oggetto rigido; i mezzi in transito in questo caso generano delle sollecitazioni che creano delle piccole onde in superficie. Questa condizione si verifica solitamente solo in caso di errori in fase di produzione del conglomerato, che risulta troppo liquido.

Grado di severità⁽¹⁾

“Differenziamo basso, medio ed alto grado di severità, in dipendenza della perdita di qualità di marcia (tab.14).”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 14. Pavimentazioni stradali flessibili – Spostamento del manto per spinta orizzontale

1.2.15. Essudazione di bitume



Figura 27



Figura 28

fig. 27 e 28. esempi di essudazione

Se è presente troppo bitume nella miscela, si può generare una superficie riflettente lucida (fig. 27 e 28), simile al vetro, che può diventare appiccicosa quando è asciutta e scivolosa quando è bagnata. Il motivo principale è l'aumento della temperatura superficiale per esposizione al sole: in seguito a riscaldamento infatti la viscosità aumenta, e ciò porta a spostamenti interni alla miscela.

Il bitume presente, in questo caso, va a occupare il volume dei vuoti, arrivando fino alla 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⁽¹⁾ (tab.15)

“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

Tabella 15. Pavimentazioni stradali flessibili – Spostamento del manto per spinta orizzontale

1.2.16. Levigatura dell'aggregato



Figura 29

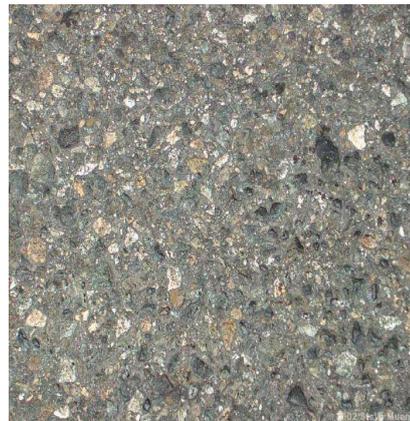


Figura 30

fig. 29 e 30. esempi di levigatura dell'aggregato

Aree di pavimentazione dove la porzione di aggregato che si estende al di sopra del legante è molto piccola o non sono presenti particelle di aggregato ruvide o spigolose (fig. 29 e 30); causano diminuzione della resistenza allo slittamento.

La causa di tutto ciò è la continua sollecitazione prodotta dai mezzi in transito, che fanno sì che l'aggregato sia levigato, provocando in questo modo una diminuzione di

aderenza. 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⁽¹⁾

“Nessuno.”

1.2.17. Scagliatura della superficie



Figura 31



Figura 32

fig. 31 e 32. esempi di scagliatura

La progressiva disintegrazione dello strato superficiale dovuto all'usura, che si verifica quando la miscela non è prodotta correttamente, o in seguito al suo indurimento; si può avere in questo caso una perdita di aggregati fini o grossolani, che vengono poi allontanati dal traffico (fig.31 e 32).

La perdita di legame fra gli inerti ed il legante bituminoso può avvenire per invecchiamento del legante (ossidazione), 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 negli strati bassi, 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.

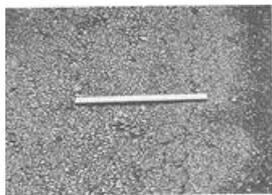
Lo stripping è molto difficile da riconoscere perché si manifesta sulla superficie come altre forme di deterioramento, ed è necessario prelevare un nucleo di pavimentazione per identificare il problema.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.16)

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

Medio – Tessitura superficiale moderatamente scabra e butterata.

Alto – Notevoli quantità di inerte asportato; 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

Tabella 16. Pavimentazioni stradali flessibili – Scagliatura della superficie

1.2.18. Rattoppi



Figura 33



Figura 34

Fig. 33 e 34. esempi di rappezzi

Zone della pavimentazione che vengono rimpiazzate allo scopo di correggere ammaloramenti precedenti (fig. 33 e 34). Il rattoppo si configura come difetto, poiché la nuova superficie e le aree limitrofe non assumono nuovamente le proprietà tecniche e funzionali previste in origine.

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

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.17)

“Basso – Rattoppo in buone condizioni, presenta un basso livello di ammaloramento.

Medio – Rattoppo moderatamente deteriorato.

Alto – Rattoppo deteriorato, necessita di sostituzione immediata.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 17. Pavimentazioni stradali flessibili – Rappezzi

1.2.19. Essudazione di acqua e pompaggio



Figura 35



Figura 36

fig. 35 e 36. esempi di essudazione

Si verifica quando l'acqua fuoriesce da giunti o fessure o attraverso uno strato 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 (fig. 35 e 36). 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.

1.2.20. Attraversamento binari



Figura 37



Figura 38

fig. 37 e 38. esempi di danni per attraversamento binari

Si possono notare delle irregolarità superficiali all'interno ed all'esterno della fascia dove sono collocati i binari (fig. 37 e 38): tutti i danni osservabili vengono catalogati come causati dall'attraversamento.

Grado di severità⁽¹⁾ (tab.18)

“Distinguiamo grado di severità basso, medio, e alto, in base alla perdita di qualità di marcia.”



Severità bassa



Severità media



Severità alta

Tabella 18. Pavimentazioni stradali flessibili – Attraversamento binari

Bibliografia

- “Pavement Management for airports, roads, and parking lots”, M.Y. Shahin
- “Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys”, ASTM D6433-03
- "Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements", FAA – AC 150/5380-6

- ⁽¹⁾http://www.alphaconsult.it/fototeca_siises/documenti/CLASSIFICA%20DEGLI%20AMMALORAMENTI.html

Cap. 2 Analisi procedurale degli interventi di riparazione



Figura 39

fig. 39. tratto stradale soggetto a manutenzione ordinaria

Tutte le strade, secondo quanto previsto dall'articolo 2 del Codice della Strada, si classificano in funzione delle loro caratteristiche costruttive, tecniche e funzionali; a seconda delle componenti di traffico ammesse, i carichi, a cui le strade vengono soggette, portano nel tempo ad un deterioramento, e dunque queste devono essere sottoposte a manutenzione (fig.39).

Ogni intervento di manutenzione della pavimentazione stradale, sia esso ordinario o straordinario, è un'attività basilare del gestire un'infrastruttura, del quale se ne occupa l'Ente Proprietario o il gestore.

I passaggi fondamentali per una corretta progettazione dell'intervento vengono studiati da R. Galizia: "Analisi dei dissesti stradali mediante ispezione visiva al fine

della programmazione di interventi manutentivi: il caso studio di una strada provinciale”, Politecnico di Milano.

Come prima fase del processo (prima ancora di iniziare le analisi sul campo e identificare le possibili strategie), è opportuno stabilire innanzitutto il budget di spesa che l’Ente è disposto a stanziare per gli interventi manutentivi; è bene sottolineare che al giorno d’oggi si cerca di impiegare materiali tecnologici in modo da eliminare per quanto possibile le fonti di degrado.

Successivamente si procede con la misurazione del danno cui l’infrastruttura è affetta, tramite dei controlli visivi, seguiti da una valutazione più oggettiva tramite indici di stato, i quali danno un’idea quantitativa sullo stato di salute della strada; una volta determinati questi indici si può realizzare una mappatura della condizione reale della porzione dell’infrastruttura e localizzare i punti con maggior degrado, che richiedono urgenti interventi di ripristino dello stato iniziale.

Infine, a seconda del tipo, della qualità e quantità dei dati disponibili, dopo aver definito benefici e costi di ciascuna strategia manutentiva, si scelgono gli interventi da realizzare, seguendo il criterio di massima redditività (fig. 40).

Infatti l’obiettivo finale è quello di gestire saggiamente le risorse economiche disponibili stabilendo con criterio un ordine di priorità degli interventi di manutenzione; ad ogni buon conto si deve considerare che lavorare “a regola d’arte” permette di ottenere un buon livello di sicurezza e comfort della strada, dando in aggiunta spazio ad un notevole risparmio economico sul lungo termine.



Figura 40

fig. 40. Operazione di stesura di uno strato di conglomerato bituminoso

Per identificare i danni subiti, ogni Ente deve prevedere un “Catalogo dei Dissesti” (Regione Lombardia – “Catalogo dei dissesti delle pavimentazioni stradali”, allegato B, 2005.), che ha valenza entro quella specifica gestione, e permette di valutare la condizione della rete; su questa base si prendono decisioni in merito sia a dove intervenire, sia in che modo (priorità e modalità di intervento).

Tramite ausilio fotografico vengono determinati i vari livelli di gravità che si possono presentare, e si effettua una paragone con altri ammaloramenti simili, prevedendo anche come questi potrebbero evolvere nel tempo.

Le sezioni dell’infrastruttura che vengono attenzionate dovrebbero avere un’estensione spaziale compresa tra i 50 ed i 100 metri.

Cap. 2.1 Rilievo degli ammaloramenti e Indici di Stato

Gli Enti competenti devono organizzare la manutenzione delle proprie infrastrutture in modo da soddisfare i criteri di comfort e sicurezza, e contemporaneamente gestire

al meglio le risorse di cui sono in possesso (Regione Lombardia – “Catalogo degli interventi di manutenzione sulle pavimentazioni stradali” allegato C, 2005).

Per far ciò, esistono dei sistemi specifici per la manutenzione; si tratta di sistemi che si fondano sull’aver a disposizione le informazioni necessarie per compiere le scelte corrette in merito di manutenzione, e sui procedimenti di stima più adeguati (Regione Lombardia – “Criteri per lo sviluppo dei sistemi di gestione della manutenzione delle pavimentazioni stradali”, allegato D, Linee Guida, 2005).

In questo senso, vanno determinati gli indici di stato, e va analizzata la loro evoluzione nel tempo. Per ogni tipologia di danno va individuata una soluzione, fornendo un indice dello stato della pavimentazione.

La progettazione di interventi di risanamento, se e quando definita per singoli tratti stradali, garantisce certamente livelli di sicurezza maggiori.

Tra i vantaggi che si hanno seguendo questo sistema ci sono: onere computazionale ridotto (meno dati da elaborare), maggiore facilità nel determinare l’evoluzione dello stato dell’infrastruttura (possibilità di stilare una lista delle priorità).

Definiamo adesso l’indice della Normativa Svizzera (SN640925), detto I_1 , usato per la classificazione della condizione della superficie dell’infrastruttura.

I_1 varia fra 0 (degrado nullo) e 5 (condizione peggiore possibile), e viene stimato partendo dall’osservazione degli ammaloramenti, catalogati come segue:

- “scivolosità della superficie;
- degrado del rivestimento (sgranamento, distacchi superficiali, buche, fessure);
- deformazioni del rivestimento (avvallamenti, corrugamenti, ormaie);
- degrado strutturale (fessurazioni longitudinali, a ragnatela, sollevamenti);
- degrado dei rattoppi.”

Per il calcolo dell’indice I_1 si utilizzano le formule seguenti, prese dalla Normativa Svizzera SNV 640925:

$$\begin{array}{ll} \text{se: } \sum(G_i * M_i) \leq 50 & I_1 = \frac{\sum(G_i * M_i)}{10} \\ \text{se: } \sum(G_i * M_i) > 50 & I_1 = 5 \end{array}$$

dove:

- “ M_i = peso ponderale attribuito a ciascuna categoria di ammaloramento (tab.19);
- G_i = gravità ed estensione dell’ammaloramento (tab.20, 21, 22).”

L’indice I_1 è valutato come segue:

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

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



Tabella 19.

tabella 19. Valori di M_i da assegnare a ciascuna categoria di degrado superficiale (SN 640925)

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



Tabella 20

tabella 20. Valori di G_i in funzione della classe di severità e di estensione (SN 640925)

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



Tabella 21

tabella 21. Definizione delle classi di severità e di estensione (SN 640925)

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



Tabella 22

tabella 22. Definizione delle classi di severità e di estensione (SN 640925)

Un altro indice globale adoperato è l'indice PCI, utilizzato in ASTM D6433-03, il quale assegna un valore oggettivo allo stato di salute della pavimentazione al momento dell'analisi, considerando tipo, estensione e severità degli ammaloramenti. Questo indice consente una stima obiettiva della condizione della pavimentazione, ed anche di misurare l'evoluzione dell'ammaloramento, definendo una scaletta delle maggiori operazioni da svolgere, in base alla loro importanza (fig. 41); l'indice PCI ha un suo standard, che è definito dalla norma ASTM D6433-11.

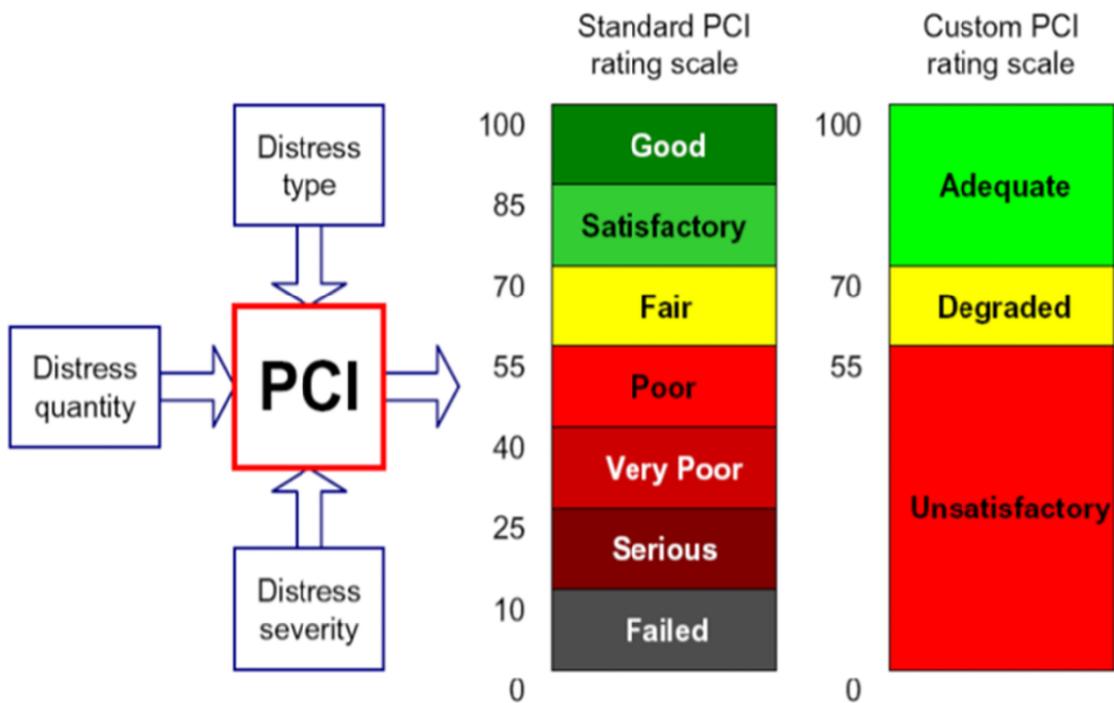


Figura 41

Fig. 41. valori dell'indice PCI

Il PCI può variare fra 0 e 100, (condizione più sfavorevole ed ottimale rispettivamente, rispetto allo stato della pavimentazione); per norma i valori sono anche associati ad una diversa gradazione di colore.

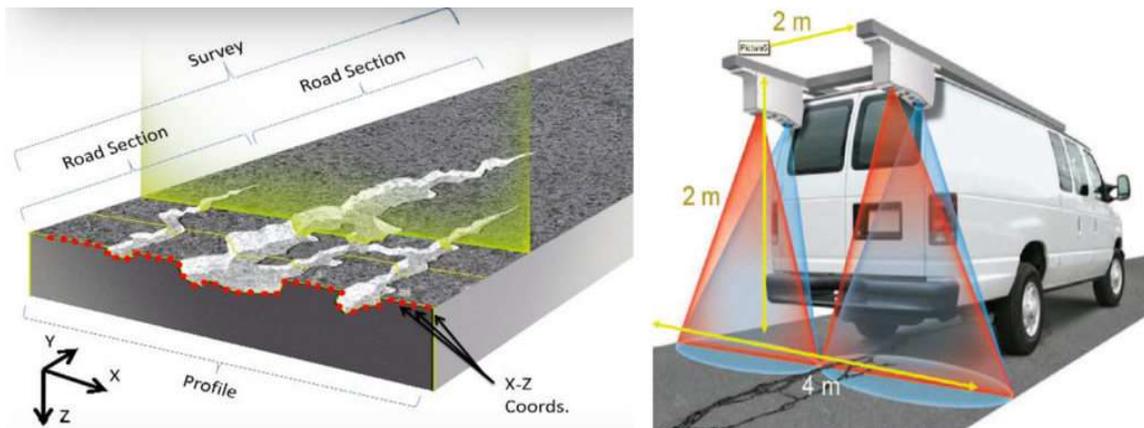


Figura 42

fig. 42. esempio di un rilievo

In “Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys”, ASTM D6433-03, possiamo osservare come viene ricavato questo indice; si procede con l’effettuare una scansione del tratto stradale tramite telecamere laser di tipo “Laser Crack Measurement System (LCMS), posizionate su un veicolo. Una volta raccolte le informazioni necessarie, queste vengono processate ed analizzate da algoritmi preposti, allo scopo di valutare i difetti presenti sul tratto in esame, definendoli sia per tipologia, sia per grado di danno (fig.42). Un addetto si occuperà della gestione delle informazioni affinché si abbia subito contezza dello stato della pavimentazione, per poter meglio programmare e valutare le operazioni da realizzare.

Cap. 2.2 Programmazione delle tecniche di intervento nella manutenzione

Per ottimizzare i costi e limitare i disagi alla circolazione occorre saper trovare il momento in cui intervenire con la manutenzione della pavimentazione, all’interno della sua vita utile.

Come intervenire nella maniera più idonea richiede esperienza e strategie procedurali efficaci.

Gli interventi si dividono in due categorie: preventivi (prima che si evidenzino danni importanti) e successivi (ristabiliscono le condizioni iniziali in seguito a danni).

Gli interventi invece sono distinti in:

- manutentivi: stato di ammaloramento modesto in superficie (manutenzione di buche (fig.43 e 44), rappezzi, trattamenti superficiali);
- riabilitativi: l’ammaloramento della pavimentazione viene generato da interventi strutturali (ricostruzione degli strati superficiali, rifacimento del conglomerato).

In ultimo si pianificano le fasi che riguardano la manutenzione.



Figura 43



Figura 44

fig. 43 e 44. Esempi di intervento manutentivo: riempimenti di buche

Cap. 2.3 Possibili risoluzioni dei problemi

Le risoluzioni dei danni vengono affrontate in "Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements", FAA - AC 150/5380-6, 12/3/82, in "Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction", Lanham et al.

2.3.1. Fessurazione a ragnatela

Riparazione: si dovrebbe innanzitutto esaminare la fessurazione per stabilire il motivo principale del cedimento tramite lo scavo di una fossa o il carotaggio della pavimentazione e determinare se l'umidità del sottosuolo sia o meno un fattore che contribuisce; la riparazione delle cricche da fatica rientra generalmente in una di queste due categorie:

- Piccola fessurazione da fatica localizzata, indicativa di una perdita del supporto del sottofondo (occorre rimuovere l'area di pavimentazione incrinata, quindi scavare e sostituire l'area di sottofondo scadente e migliorare il drenaggio di tale area se necessario);
- Ampie aree incrinata da fatica, indicative di cedimento strutturale generale (occorre posizionare un rivestimento sull'intera superficie della pavimentazione; tale rivestimento deve essere sufficientemente forte strutturalmente per sostenere il carico previsto perché la sottostante pavimentazione fessurata da fatica molto probabilmente contribuisce poco o per niente alla resistenza) (Roberts et. al., 1996).

2.3.2. Fessurazione a blocchi, di bordo, longitudinale o trasversale

Riparazione: le strategie dipendono dalla gravità e dall'entità della rottura del blocco:

- Crepe di bassa gravità (larghezza < 1/2 pollice). Sigillare le fessure per impedire l'ingresso di umidità nel sottofondo e l'ulteriore sfilacciamento dei bordi delle fessure. (Roberts et. al., 1996) . Se l'aspetto è importante o le crepe sono estese, è possibile posizionare un sigillo di impasto liquido sulle fessure sigillate.
- Crepe di elevata gravità (larghezza > 1/2 pollice e crepe con bordi sfilacciati). Rimuovere e sostituire lo strato di pavimentazione fessurato con un rivestimento.

2.3.3. Fessurazione di richiamo

Riparazione: le strategie dipendono dalla gravità e dall'estensione della fessurazione:

- Crepe di bassa gravità (< 1/2 pollice di larghezza e crepe poco frequenti). Occorre sigillare le fessure. In generale, i giunti rigidi della pavimentazione finiranno per riflettere attraverso un rivestimento di conglomerato bituminoso senza un'adeguata preparazione della superficie.

- Crepe di elevata gravità (larghezza > 1/2 pollice e numerose crepe). Asportare e sostituire lo strato di pavimentazione fessurata con uno strato di ricoprimento previa opportuna preparazione della pavimentazione rigida sottostante.

2.3.4. Fessurazione da scorrimento

Riparazione: rimozione e sostituzione dell'area interessata.

2.3.5. Ormaiamento

Riparazione: se una pavimentazione risulta fortemente solcata, si dovrebbe procedere con un'analisi che determini la causa principale del cedimento (ad es. compattazione insufficiente, solchi del sottofondo, scarsa progettazione della miscela o usura degli pneumatici chiodati); la pavimentazione in seguito deve essere livellata e ricoperta. In caso di lievi solchi (< 1/3 di pollice di profondità) generalmente si può trascurare il problema.

2.3.6. Ondulazioni

Riparazione: le strategie di riparazione generalmente rientrano in una di queste due categorie:

- Piccole aree localizzate di ondulazione o spinta; basta rimuovere la pavimentazione distorta e la toppe.
- Ampie aree ondulate (indicative di un deterioramento generale del conglomerato bituminoso); rimuovere la pavimentazione danneggiata e il rivestimento.

2.3.7. Depressioni

Riparazione: per definizione, le depressioni sono piccole aree localizzate. Gli avvallamenti dovrebbero essere riparati rimuovendo la pavimentazione interessata, quindi scavando e sostituendo l'area del sottofondo scadente ed infine rattoppare sul sottofondo riparato.

2.3.8. Buche

Riparazione: si sistemano attuando le corrette tecniche di rattoppamento.

2.3.9. Essudazione di bitume

Riparazione: effettuando misure di riparazione si può eliminare o ridurre la pellicola di legante per asfalto sulla superficie della pavimentazione, ma così facendo potrebbe non risolversi la vera causa del sanguinamento:

- Il sanguinamento minore può spesso essere corretto applicando sabbia grossolana per eliminare il legante di asfalto in eccesso;
- Il sanguinamento maggiore può essere corretto tagliando l'asfalto in eccesso con un moto-livellatore o rimuovendolo con una pialla a caldo. Se la superficie risultante è eccessivamente ruvida, può essere necessario un rifacimento.

2.3.10. Levigatura dell'aggregato

Riparazione: bisogna applicare un sigillante in impasto liquido antiscivolo, BST o un rivestimento non strutturale.

2.3.11. Scagliatura della superficie

Riparazione: è necessario esaminare un marciapiede in disordine allo scopo di comprendere il motivo principale del cedimento. Le strategie di riparazione generalmente rientrano in una di queste due categorie:

- Piccole aree localizzate di sfilciamento. Rimuovere il marciapiede sfilciato e la toppe. Se l'infrastruttura è ancora strutturalmente solida, lo sfilciamento può essere riparato con un sigillante per nebbia o un sigillante per malta liquida.
- Ampie aree sfilciate indicative di fallimento generale dell'HMA. Rimuovere la pavimentazione danneggiata e il rivestimento.

Se si verifica il fenomeno di "stripping", invece bisognerebbe verificare la causa del cedimento (ad esempio umidità), e successivamente rimuovere gli strati e sostituirli, dopo aver risolto gli eventuali problemi di drenaggio del sottosuolo.

2.3.12. Rattoppi

Riparazione: le toppe sono esse stesse un'azione di riparazione. Per rimuoverle è necessario mettere un rivestimento strutturale o non strutturale.

2.3.13. Essudazione di acqua e pompaggio

Riparazione: lo spurgo o il pompaggio dell'acqua devono essere esaminati per stabilire il motivo principale; se il problema è una falda freatica alta o uno scarso drenaggio, è necessario migliorare il drenaggio del sottosuolo. Se invece il problema è un impasto poroso (in caso di perdite d'acqua) è possibile applicare un sigillo anti-appannamento o un sigillante per impasto liquido per limitare le infiltrazioni.

Bibliografia

- R. Galizia – Tesi di Laurea Magistrale: “Analisi dei dissesti stradali mediante ispezione visiva al fine della programmazione di interventi manutentivi: il caso studio di una strada provinciale”, Politecnico di Milano, A.A. 2019-2020.
- Regione Lombardia – “Catalogo dei dissesti delle pavimentazioni stradali”, allegato B, 2005.
- Regione Lombardia – “Catalogo degli interventi di manutenzione sulle pavimentazioni stradali”, allegato C, 2005.
- Regione Lombardia – “Criteri per lo sviluppo dei sistemi di gestione della manutenzione delle pavimentazioni stradali”, allegato D, Linee Guida, 2005.
- Normativa Svizzera SNV 640925, Aprile 1997.
- "Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements", FAA - AC 150/5380-6, 12/3/82.
- “Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction”, Lanham et al.
- “Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys”, ASTM D6433-03
- "Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements", FAA - AC 150/5380-6, 12/3/82.

Cap. 3 Introduzione ai sistemi WIM

Esiste una relazione (globalmente accettata) tra il danneggiamento della pavimentazione stradale e la potenza quarta del carico agente su un asse di un veicolo, dunque c'è una necessità impellente di conoscere i reali carichi del traffico che interessano le sezioni stradali, sia per la loro costruzione, sia per la loro manutenzione.

Per quantificare il danneggiamento del manto stradale viene utilizzato l'ESAL, che sta per Equivalent Single Axle Load (Carico Equivalente per Singolo Asse), attraverso cui si esprime il danneggiamento complessivo in relazione a quello dato da un carico di riferimento (in genere 10 ton.) agente su un singolo asse.

La seguente formula per il calcolo dell'ESAL è tratta da "AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements, 1993":

$$ESAL = \sum_i (L_i/L_{ref})^4$$

Dove: L_i = carico sull'asse i -esimo del veicolo in ton. , L_{ref} = carico asse di riferimento = 10 ton.

Un carico assiale è la forza istantanea applicata da una ruota o un gruppo di ruote appartenenti ad un asse sulla pavimentazione. La forza varia lungo la strada in dipendenza del carico statico, dello stato del manto stradale, dalla velocità e dalle sospensioni del veicolo. Il sensore WIM misura questa forza, la quale può differire anche in maniera sostanziale dal carico statico, in un dato punto. Il rapporto tra Forza dinamica e Carico statico viene definito "Fattore di Impatto Dinamico" (DIF).

La media della Forza dinamica rilasciata lungo il cammino tende al Carico statico, dunque campionare questa forza in diverse sezioni e combinare i risultati ottenuti può portare ad una migliore stima del carico statico. Questo principio viene messo in pratica attraverso sensori multipli (MS-WIM): per determinare a che distanza

posizionare questi sensori, ed in quale quantità, si devono considerare le caratteristiche del segnale della Forza dinamica, ossia auto-frequenza, ampiezza e fase.

Ad esempio, considerando un modello sinusoidale, in cui abbiamo una frequenza media f ed una velocità media V , lo spaziamento d (dato un certo numero di sensori N) si ricava come:

$$d = \frac{2(N-1)V}{fN^2}$$

Tale Formula è stata proposta da Cebon e Winkler.

E' stato dimostrato nel progetto WAVE che in presenza di 10-12 sensori "perfetti" ed un algoritmo avanzato (Sainte-Marie), la precisione teoretica dello stimatore di carico statico potrebbe essere del 2%. Ad ogni modo, a causa degli errori intrinseci di ogni sensore WIM ed altri fattori esterni, i risultati sperimentali hanno mostrato una precisione compresa tra il B+ (7) ed il B (10) per un numero di sensori compreso tra i 6 ed i 12, con i singoli sensori appartenenti alla classe C (15) (COST323).

Cap. 3.1 Cos'è un sistema Weigh In Motion (WIM)

Il Weigh in Motion è un sistema di indagine, per la pesatura dinamica dei veicoli in movimento su strada. In generale, un sistema di questo tipo è caratterizzato dai seguenti parametri:

- superficie dell'area di indagine (area limitata, grande, urbana, extraurbana, ecc.);
- estensione del tratto di interesse (intersezione, singolo ramo o insieme di rami ed intersezioni, ecc.);
- periodo di osservazione (tempo di riferimento, durata dello studio, frequenza delle misure);
- numero e genere di variabili;
- tecniche e tecnologie (attrezzature ed organizzazione) per le misurazioni.

Nel corso del tempo la emergente necessità di catalogare in maniera continuativa ed accurata le informazioni sul traffico, per periodi estesi e di durata giornaliera (giorno e notte), ha spinto gli studi di settore a generare algoritmi di raccolta dati che soddisfino i requisiti richiesti.

Questi sistemi automatici di solito sono formati da quattro strumenti base:

1. un rilevatore;
2. un interprete;
3. un registratore;
4. un elaboratore.

Il rilevatore emette un segnale che viene ricevuto ed in seguito decodificato dall'interprete. Questo impulso, una volta decifrato, viene inviato al registratore per immagazzinare le informazioni che serviranno all'analisi; questa può essere compiuta dall'elaboratore, o in tempo reale o successivamente; il rilevatore può essere collocato sulla pavimentazione oppure entro o in prossimità della carreggiata. Altri metodi, più sofisticati, si fondano sulla misurazione di segnali o immagini tramite satelliti.

Per il solo monitoraggio, quelli più performanti in quanto a velocità di ottenimento dati e precisione, sono rappresentati dai Weigh In Motion (W.I.M.). Per "Weigh In Motion" viene intesa la procedura che porta a misurare in maniera dinamica le sollecitazioni trasmesse dalle ruote di un mezzo in transito (e di conseguenza il peso lordo), e come la forza viene distribuita per singolo pneumatico, per ogni asse o gruppo di assi, allo stesso modo di una prova di carico statica.

Ci sono due tipi principali di bilance WIM:

- celle di carico: una serie di celle di carico sono distribuite tra una piastra rigida ed un telaio di supporto, al fine di valutare le forze verticali che scaricano i pneumatici; la calibrazione di queste celle avviene in fabbrica, ed è accompagnata da una certificazione. E' una tecnologia molto costosa, in quanto permette misure molto accurate e che non dipendono dal luogo in cui

la piastra viene caricata. In genere la loro fascia di operatività è in condizioni di basse velocità.

- Piastre flettenti: la piastra viene supportata dal telaio esternamente, coi soli estensimetri a misurare la flessione della piastra, che si genera nel momento in cui una ruota, o un asse, passano sopra di essa. Le deformazioni sono proporzionali alla forza applicata nel punto, e, sommando i contributi dati dai vari estensimetri, si riesce ad ottenere la posizione della ruota e, in maniera indipendente, anche la forza agente in direzione verticale; questo tipo di WIM è più economico del precedente, e tuttavia anche meno preciso. Si impiega primariamente in condizioni di alte velocità.

Altre tecnologie sfruttano dei tappetini sistemati sulla pavimentazione, estesi per tutta l'area di contatto dei copertoni. Questi tappetini servono a stimare la variazione di capacità generata dalla pressione che la ruota trasmette sulla pavimentazione.

Il WIM valuta il peso tutti i veicoli che passano sull'area in cui esso opera e, in caso di veicoli in sovrappeso, cattura un'immagine del mezzo, il quale viene anche mandato in un'area dedicata. In questo luogo, esso viene pesato con una bilancia statica, o con un WIM a bassa velocità, che sono strumenti autorizzati dalla legge. In questo modo più del 95% dei controlli riguarda i mezzi pesanti effettivamente in sovrappeso, e ciò ha come conseguenza evidente una maggiore efficienza ed efficacia dei controlli, scongiurando di fermare (e quindi "premiando") i mezzi di quelle compagnie che rispettano la legge.

Le bilance WIM sono piastre strumentate all'interno di un telaio rigido installato nella pavimentazione, le quali stimano le forze verticali che i pneumatici in movimento scaricano sulla superficie. La lunghezza di queste piastre deve essere maggiore dell'impronta dei copertoni, e minore dello spazio minimo fra gli assi, invece la larghezza è variabile in dipendenza delle misurazioni da effettuare (bilance per ruota o bilance per asse); in questo modo possono misurare la forza dinamica esercitata dai pneumatici o dall'intero asse in un'unica volta.

I primi W.I.M. sono stati ideati negli Stati Uniti (in Texas), negli anni '50, da Pr. Clyde Lee. In principio avevano lo scopo di catalogare una vasta serie di carichi, utilizzando tali informazioni per la progettazione di strade (seguendo i criteri della pavimentazione ASHTOO). All'inizio sono stati impiegati dei sensori di tipo bending plates.

Sempre negli Stati Uniti è stato ideato un sistema Bridge W.I.M., sul finire degli anni '70, in seguito sviluppato in Europa a partire dal 1990.

Troviamo il primo standard W.I.M. (ASTM-1318) in Nord America, edito alla fine dello scorso secolo; in seguito l'azione COST323 -Cooperazione europea nel settore della scienza e della tecnica- ha delineato le caratteristiche per i W.I.M. in Europa (pre-standard), nonché i test per valutare la loro possibilità di impiego (il COST 323 è una delle azioni sostenute dalla COST "trasporti e sviluppo urbano", avviato nel 1992).

"Il progetto WAVE, che si occupa di ricerca a livello europeo (assi e veicoli per la pesatura in movimento per l'Europa), insieme ad altri studi, ha portato a nuove tecnologie e metodologie di W.I.M.", Progetto Sentinel.

MODALITA' DI MONITORAGGIO TRAMITE DISPOSITIVI W.I.M.												
MISURA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEL FLUSSO VEICOLARE	Volume di traffico	Classificazione veicolare	Numero di assi	Distanziamento tra gli assi	Peso complessivo	Peso per singolo asse	Velocità	Headway	Gap	Lunghezza dei veicoli	Tempo di occupazione	
APPLICAZIONI IMPLEMENTATE	Progettazione di strade e ponti			Manutenzione delle pavimentazioni		Controllo soglie di pericolo sovraccarico			Gestione del traffico			
TIPOLOGIE DI SISTEMI W.I.M.	INSTALLAZIONI FISSE	Sistemi di pesatura a piastra			Sensori capacitivi							
					Bending plates							
		Sistemi di pesatura con sensori a barra			Sensori a celle di carico							
					Cavi piezoelettrici e sensori BL							
		Sensori al quarzo										
		Sensori a fibra ottica										
	INSTALLAZIONI PORTATILI	Sistemi di pesatura a ponte										
		Sistemi di pesatura Multisensor										
		Sensori capacitivi										
		Sensori piezoelettrici										
Bridge W.I.M.												

Tabella 23

Tabella 23 – Modalità di monitoraggio tramite dispositivi W.I.M.

Oggi tramite i sistemi (W.I.M.) è possibile effettuare rilevazioni ed elaborare informazioni particolarizzate, ed in tempo reale, del traffico, senza mutarne i flussi; riescono inoltre a generare dati fondamentali per la pianificazione e progettazione di reti stradali future (tab.23).

Alcuni dati:

- ad oggi esistono oltre 70.000 sensori, in più di 50 Paesi, ed in Italia più di 40 postazioni sono state messe in opera recentemente (“Sistemi di monitoraggio del traffico, linee guida per la progettazione”);
- per poter utilizzare questo sistema di pesatura dinamica occorrono una certificazione tecnica di conformità (OIML R134), un’approvazione come strumento a fine legale/commerciale da parte del Ministero dello Sviluppo Economico (a livello nazionale), l’omologazione per rilevamento infrazioni da parte del Ministero dei Trasporti (ad oggi, non ancora rilasciato);
- la funzionalità di questi apparecchi è validamente testata fino a 140 Km/h;
- per questioni di sicurezza e durabilità nel tempo, si opta per soluzioni non rimovibili, con assenza di viti e bulloni (si evitano le piastre).

E’ di fondamentale interesse l’informazione ricavata dai carichi prodotti dal traffico, sia allo scopo di dimensionare correttamente le sezioni della pavimentazione, sia per ponderare la tipologia di operazione da effettuare. Importantissimo è in particolare valutare il carico per singolo asse, elemento su cui si fonda la stima dello sviluppo del degrado sull’infrastruttura.

Tramite pesatura dinamica non è possibile stimare con precisione il carico, infatti è proibito sanzionare basandosi esclusivamente sui dati W.I.M. I risultati ottenuti da questi strumenti devono essere validati tramite una postazione che effettui una pesatura statica. Il W.I.M. funzionerà dunque da filtro.

Di solito il sistema di gestione prevede anche la presenza di una telecamera, per identificare il mezzo sospetto. Dal punto di vista ingegneristico (pianificazione), i dati di flusso, misurati direttamente, vengono adoperati per effettuare una stima dei

mezzi pesanti che utilizzano l'infrastruttura, valutando i costi della congestione e l'eventuale progettazione di altre infrastrutture, piuttosto che valutare nuovi percorsi per i mezzi pesanti.

Oggi sensori W.I.M. a strisce, per applicazioni su pavimentazione, sono basati su cristalli di quarzo, ceramiche, polimeri, estensimetri elettrici o fibra ottica.

In base al range di operatività dei veicoli troviamo:

- Low-Speed – W.I.M;
- High-Speed – W.I.M.

Per basse velocità, la pesatura avviene in aree apposite (fig. 45).

I sistemi LS-W.I.M. che operano a basse velocità, si avvalgono in genere di sensori a celle di carico.



Figura 45

Figura 45 – Area dedicata alla pesatura a bassa velocità

La pesatura dinamica HS-WIM avviene direttamente sull'infrastruttura, senza che i mezzi rallentino o si debbano fermare (fig. 46).



Figura 46

Figura 46 – Configurazione della pesatura ad alta velocità (HS-W.I.M.)

Come descritto nella relazione del progetto SENTINEL, i sistemi W.I.M. sono formati sostanzialmente da:

- “- sensori integrati nella pavimentazione;
- un'unità di condizionamento del segnale, la quale include tutta l'elettronica, compresi strumento di acquisizione dati, convertitore A/D, apparecchi per il calcolo del peso e per l'auto-calibrazione, più i dispositivi di archiviazione e comunicazione”.

In basso si vede lo schema di un sistema WIM (fig. 47).

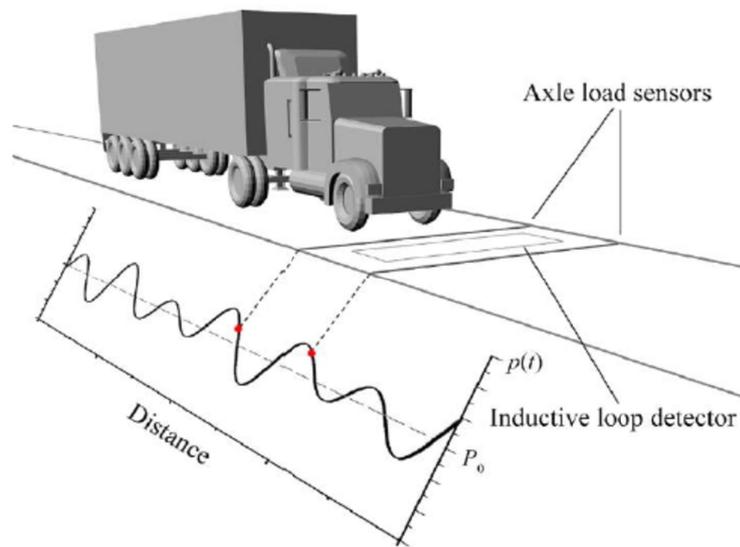


Figura 47

Figura 47 - Struttura del sito W.I.M.: $p(t)$ - carico dinamico sull'asse, P_0 - componente statica del carico dinamico dell'asse

Oggi troviamo in commercio due macro categorie di sistemi W.I.M. :

- sistemi per installazioni fisse;
- sistemi portatili.

Quelli per installazioni fisse hanno sensori sommersi nel manto stradale (migliore accuratezza e lunga vita dei sensori). A questa tipologia di WIM appartengono:

1. Sistemi di pesatura a piastra (fig. 48);
2. Sistemi di pesatura a barra;
3. Sistemi a ponte.

Cap. 3.2 Sistemi di pesatura a piastra



Figura 48

Figura 48 – Configurazioni delle piastre di pesatura dinamica montate sulla pavimentazione stradale

3.2.1 Sensori di tipo capacitivo

I sensori capacitivi altro non sono che dei condensatori (fig. 49); la pressione che i mezzi pesanti scaricano sui sensori, produce delle differenze di capacità elettrica, causate dall'avvicinamento delle piastre del condensatore al passaggio del mezzo.



Figura 49

Figura 49 - Sensore capacitivo installato nella pavimentazione

Per aumentare la precisione bisogna effettuare più misurazioni, ad esempio mettendo diversi sensori ravvicinati su tutte le corsie.

La precisione di tali sistemi si attesta al giorno d'oggi intorno al 90%.

3.2.2 Bending plates

I sensori "*bending plates*" sono composti da piastre con estensimetri (fig.50).

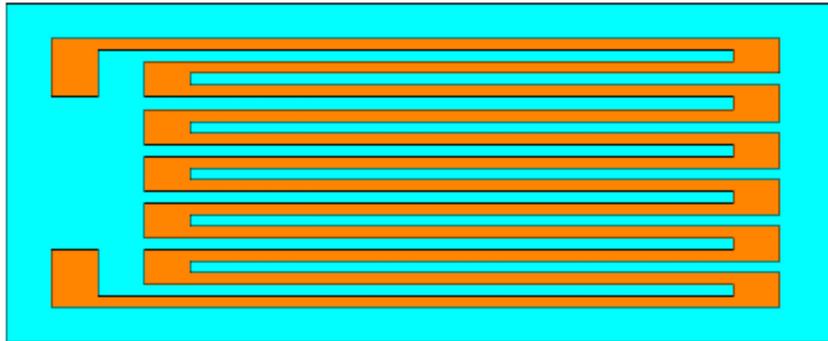


Figura 50

Figura 50 - Schema di un estensimetro lineare

Gli spostamenti dipendono dall'azione verticale. Unendo insieme l'effetto di vari estensimetri, transitato il mezzo (fig. 51), il sistema valuta lo sforzo esercitato e determina il carico dinamico. Quello statico è invece stabilito tramite dei coefficienti di calibrazione. Questi coefficienti considerano gli elementi che influiscono sulle misure (ad esempio velocità, oscillazioni dovute alle sospensioni ecc.).



(a)



(b)

Figura 51

Figura 51 - (a) Sensori bending plates installati nella pavimentazione; (b) Veicolo transitante sopra una piastra del tipo "Bending plate"

Le stazioni W.I.M. con sensori "bending plate" sono formate da una o due piastre e da spire induttive. E' possibile mettere in linea le piastre, oppure sfalsarle di alcuni metri (fig.52). In genere per carreggiate interessate da scarso flusso veicolare viene impiegata una sola piastra.



Figura 52

Figura 52 - Tipica configurazione di misura di un sistema W.I.M. del tipo “*bending plate*”

Si può stabilire la velocità dei mezzi (progetto SENTINEL):

- “- in base ai segnali prodotti dalle spire induttive;
- in base ai segnali prodotti da una delle spire e dalle piastre;
- in base ai segnali prodotti dalle due piastre.”

Questa tipologia di W.I.M. è caratterizzata da prestazioni intermedie e costi contenuti.

3.2.3 Sensori a celle di carico

Sono annegati nel manto stradale (fig. 53), connessi ad uno strumento che permette l'elaborazione dei dati, il quale si trova in una cabina al lato dell'infrastruttura, dove vengono raccolte ed immagazzinate le informazioni.

Si tratta di sensori capaci di convertire sollecitazioni meccaniche rendendole impulsi, che si possono analizzare. La configurazione più frequente è caratterizzata da tubi che hanno un liquido all'interno. La differenza di pressione idraulica è dovuta al carico agente.



Figura 53

Figura 53 - Sistema di pesatura dinamica a cella di carico

La cella viene posizionata in direzione perpendicolare al senso di marcia, dopo una spira che ha funzione di inizializzazione del processo. Posizionare una seconda spira permette di essere molto più precisi (fig.54):

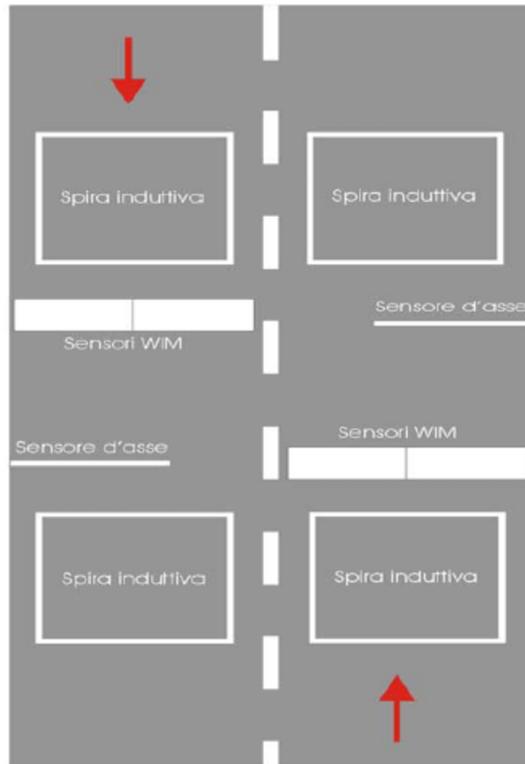


Figura 54

Figura 54 - Configurazione tipica di un sistema di pesatura dinamica a cella di carico

Questa tipologia di WIM permette di registrare in maniera meccanica i mezzi in transito, e di misurare i carichi d'asse e quello lordo del veicolo; si ha tuttavia un onere monetario "più impattante" rispetto al caso di sensori piezoelettrici.

E' inoltre di difficile installazione, sia per quanto riguarda il tempo impiegato, sia per quanto riguarda la messa in opera vera e propria.

Cap. 3.3 Sistemi con sensori a barra

Il rilevamento tramite sensori assiali piezoelettrici necessita di un cavo piezoelettrico (fig. 55a) posizionato al di sopra del manto stradale (fig. 55b), e di uno strumento in grado di registrare i dati, collocato sul bordo della pavimentazione.

Questi sensori vengono impiegati in postazioni fisse o in postazioni temporanee.



Figura 55

Figura 55 - (a) Cavo piezoelettrico; (b) Cavo piezoelettrico installato nella pavimentazione stradale

Questo tipo di sensori si deforma elasticamente in seguito a pressione, polarizzandosi e generando una variazione nel potenziale in funzione della forza. Tra le due piastre che formano il sensore viene a crearsi una variazione di potenziale, la quale genera la trasmissione di una carica elettrica le cui caratteristiche cambiano nel tempo, in funzione di peso e velocità del mezzo.

Per loro natura questi sensori funzionano grazie ad azioni dinamiche, infatti l'effetto piezoelettrico è prodotto dalla variazione di forza che viene esercitata, cosa che avviene appunto poiché la forza è dinamica. Di conseguenza tali sensori non possono essere installati laddove il range di operatività sia basso (aree di stop - and - go).

Due sensori di questo genere ci danno informazioni su:

- numero di assi;
- carico totale e per asse;
- spaziatore assiali e lunghezza totale;
- velocità.

Questi sensori sono utili perché semplici da installare e per la grande varietà di dati; i costi e la minore accuratezza sono invece i maggiori difetti.

La qualità delle misure con sistemi di questo tipo è media (i sensori sono suscettibili alla temperatura), anche a causa di un'area di contatto del sensore non troppo estesa. Per bilanciare l'effetto della temperatura, si accoppia ad un sensore di temperatura, e tramite un algoritmo si compensano le misure.

Per migliorare la precisione si può inoltre considerare di posizionare sulla pavimentazione una struttura del tipo piezo-spira induttiva-piezo (fig. 56)

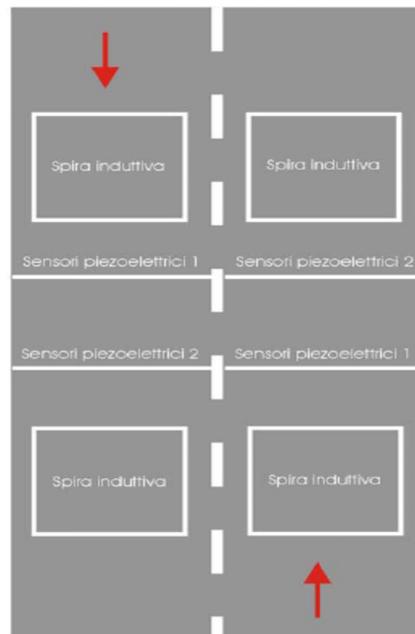


Figura 56

Figura 56 - Configurazione tipica di un sistema di pesatura dinamica con sensori piezoelettrici

3.3.1 Sensori al quarzo

Questi sensori hanno dei cristalli di quarzo immersi in un involucro di alluminio, che è al tempo stesso leggero e robusto.

Si impiega il quarzo poichè garantisce una pronta risposta alle sollecitazioni, la quale assicura una stima delle grandezze precisa ed accurata; questi cristalli producono una carica elettrica sotto sollecitazione dinamica, hanno ricettività stabile per l'intera lunghezza dei sensori e non perdono di sensibilità quando cambia la temperatura

(riescono a sopportare temperature fino a 500°C e non necessitano di correzioni). Inoltre permettono una installazione rapida e semplice (2 corsie vengono coperte in circa 8 ore).

Quando il sensore rileva la sollecitazione esterna, il quarzo genera un impulso (fenomeno piezoelettrico). Questa carica viene trasformata quindi in uno stato di tensione; a questo punto è possibile effettuare la stima del peso dell'asse o totale.

I cristalli al quarzo vengono spediti sotto forma di barre (fig. 57); all'esterno si vede l'alluminio, mentre l'interno è riempito con pastiglie di quarzo disposte a distanze regolari lungo la barra; le barre sono meccanicamente indipendenti le une dalle altre, ma connesse allo stesso elemento conduttivo per mandare l'impulso elettrico; la forma interna viene pensata in modo che solo i carichi verticali possano indurre una risposta nelle pastiglie di quarzo.

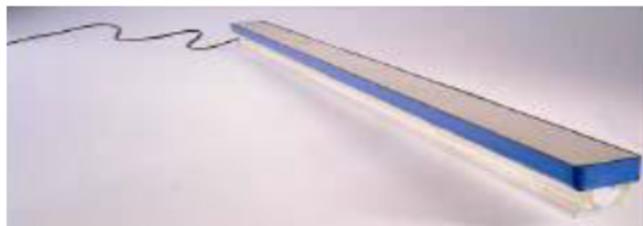


Figura 57

Figura 57 - Barra di sensori al quarzo

Il quarzo ha tra le sue caratteristiche un'elevata linearità; questi sensori hanno una maggiore precisione rispetto ai materiali ordinari. Occorre però considerare che il manto stradale funge da sostegno al sensore, e quindi in caso di variazioni di temperatura, così come il manto, allo stesso modo il sensore sarà soggetto ad una modifica e varierà la sua risposta (fig. 58).



Figura 58

Figura 58 – Operazioni di installazione di una barra

Lo schema più frequente per un sistema WIM di questo tipo consiste in una coppia di sensori accoppiati a due spire.

3.3.2 Sensori a fibra ottica

Questi sistemi (fig. 61) prevedono dei sensori composti da fasce in metallo che avvolgono solidalmente una fibra ottica (fig. 59). Viene sfruttato il comportamento foto-elastico del vetro. Successivamente all'applicazione del carico, il vetro assume un comportamento birifrangente, originando due diversi modi di propagazione (fig. 60): verticalmente il segnale procede in maniera veloce, mentre orizzontalmente in maniera lenta. Tale differenza fa sì che le componenti siano sfasate.

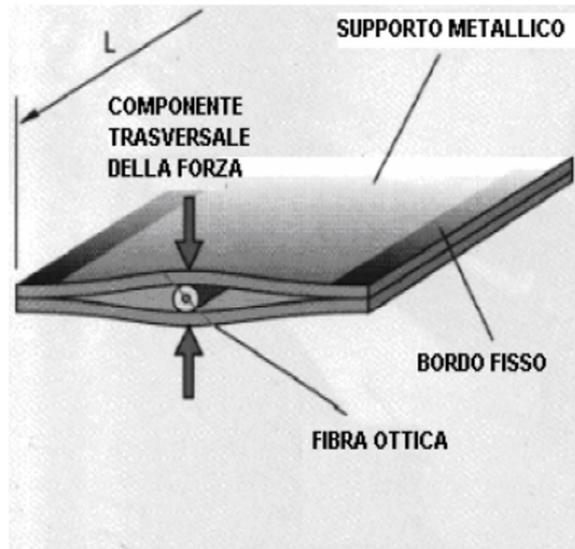


Figura 59

Figura 59 - Schema di un sensore a fibra ottica

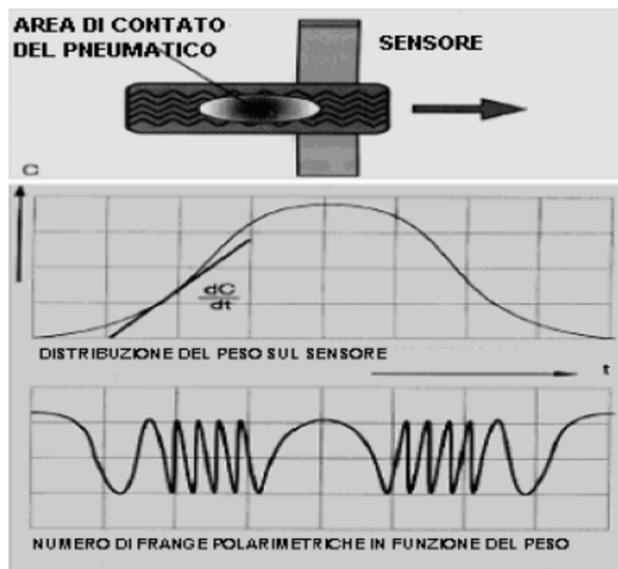


Figura 60

Figura 60 - Esempio di segnale generato da fibra ottica

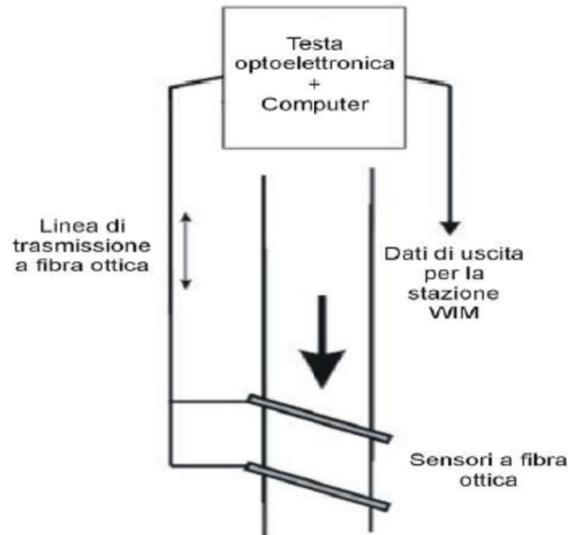


Figura 61

Figura 61 - Schema di installazione di un sistema a fibra ottica

Un tipo di sensori a fibra ottica è rappresentato dai sensori interferometrici, che godono di alta precisione.

Questi sistemi vengono impiegati regolarmente, in ogni modalità di traffico; infatti la loro prestazione non è influenzata dalla temperatura, non hanno necessità di ricevere alimentazione elettrica, sono sostanzialmente liberi da influenze elettromagnetiche, e possono garantire una grande quantità di dati.

Cap. 3.4 Sistemi a ponte B-W.I.M.

La strumentazione che questi sistemi sfruttano (fig. 62) è composta da una serie di estensimetri fissati al di sotto della pavimentazione, e da dei sensori di asse, installati sulla strada, allo scopo di valutare velocità, distanza assiale e classificare i mezzi (fig. 63). Con questi dati è possibile stimare carico totale e per asse.



(a)



(b)

Figura 62

Figura 62 - Strumentazione dei sistemi B-W.I.M.: (a) estensimetri sotto la piattaforma; (b) Sensori di asse sulla carreggiata

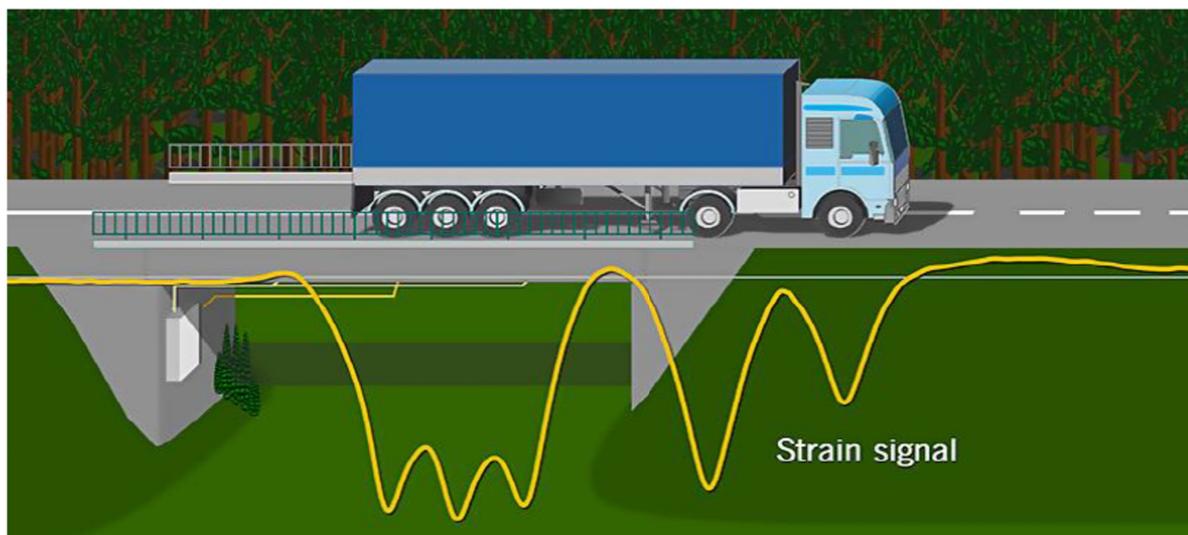


Figura 63

Figura 63 – Esempio di segnale da sistema B-W.I.M.

E' possibile ottenere dei risultati abbastanza precisi per quasi ogni tipologia di ponte, purché la pavimentazione non presenti un alto grado di ammaloramenti. Questi sistemi sono adatti a campate che variano fra gli 8 e i 25 m.

3.4.1 Multi-sensor W.I.M.

I sistemi multi-sensor sono caratterizzati da una grande quantità di sensori dai costi contenuti. Tramite la ripetizione della stima del mezzo, si riesce a valutare carico statico con un grado di precisione accettabile. Tuttavia non è possibile ad oggi appurare se il grado di precisione raggiunto vada di pari passo con la spesa necessaria per mettere in opera più sensori (oltre dieci). Con questa tipologia è comunque possibile aumentare la longevità del sistema, garantendo un decadimento lento nel tempo. Questo perché nel caso in cui un sensore dovesse guastarsi, il sistema è comunque utilizzabile (alta ridondanza).

Cap. 3.5 Sistemi di pesatura portatili

I sistemi WIM portatili permettono di misurare le grandezze di interesse temporaneamente, e su aree estese, non avendo alti costi di installazione (sono infatti installati in superficie); hanno ovviamente minore accuratezza, visto che si generano oscillazioni dei mezzi in transito a seguito dell'urto coi sensori. Per diminuire questi errori deve essere effettuata una calibrazione del sistema.

In generale, per questi sistemi, si impiegano sensori di tipo piezoelettrico e piastre capacitive; gli oneri monetari si possono limitare anche facendo in modo che solo l'elettronica abbia componenti mobili, mentre i sensori restano fissi, annegati nella pavimentazione. Così facendo, si riduce anche l'imprecisione del sistema.

3.5.1 Sensori piezoelettrici

Questi sensori vengono impiegati per applicazioni temporanee, e non è possibile usarli in ambito urbano. Ad ogni modo, l'alternativa piezoelettrica rappresenta una validissima opzione per i sistemi WIM. Questa tecnologia adopera la trasformazione di energia meccanica in elettrica (e viceversa) grazie all'uso di materiali isolanti. Questi sensori in genere vengono annegati negli strati superficiali, e sfruttano la loro sensibilità alle variazioni di carico nel tempo, invece dei carichi in termini assoluti; in seguito si misura il peso totale dell'asse immettendo le informazioni ottenute nell'analisi e moltiplicando questi risultati per la velocità, più un fattore di correzione delle misure.

3.5.2 Sensori capacitivi

Il sensore capacitivo è nella pratica un largo condensatore, installato su tutta la carreggiata, in coppia con strumentazione elettronica situata ai margini. Dopo che il veicolo passa, la sollecitazione che si viene a generare sulle piastre del condensatore diminuisce la separazione fra le armature, e ciò crea un incremento di capacità. A seguito di questo evento si genera un impulso, ricevuto dalla strumentazione, che a sua volta lo traduce in carichi, infatti si può stabilire il carico valutando la frequenza dell'impulso.

Questi sistemi hanno tuttavia scarsa precisione e, considerando che la necessaria calibrazione presenta un costo elevato, l'impiego dei sensori capacitivi nei WIM portatili è scoraggiato.

3.5.3 Bridge W.I.M.

Anche nel caso dei ponti, è possibile installare dei sistemi di pesatura dinamica per breve durata di rilevamento.

Cap. 3.6 Sistemi W.I.M. con sensori basati su tecnologia in fibra ottica

I sensori ottici sono caratterizzati da una fibra ottica, amalgamata in una densa schiuma; il funzionamento di questa tipologia di sistemi si fonda sulla decifrazione della polarimetria o sull'interferometro di Michelson. Gli strumenti dell'interferometro misurano il numero ed il periodo di frange con l'obiettivo di avvicinarsi alla stima del carico applicato; nel sensore polarimetrico invece, la luce di un diodo laser viene polarizzata da un divisore di fascio polarizzante e inviata in una fibra di trasmissione ad alta birifrangenza, così da essere sensibile ad una sola modalità di polarizzazione; in seguito uno strumento apposito identifica le differenze di segnale e converte queste ultime in emissioni elettriche utili all'analisi dei dati di traffico.

Per affidabilità e costanza, i sensori a fibre ottiche sono i migliori; inoltre hanno costi molto minori.

Il loro funzionamento è basato sul Reticolo di Bragg (modifica della diffrazione), e

sulla modifica delle caratteristiche ottiche (frequenza, polarizzazione, ecc.).

Oggi è possibile impiegare due diverse analisi al fine di determinare i carichi:

- il metodo di base;
- il metodo di area.

Sappiamo che impiegando sensori a fibre ottiche è possibile studiare e stimare tutti quei parametri che incidono sulla precisione delle misure, e quindi tenerne conto all'atto dei calcoli.

E' inoltre possibile utilizzare sensori a fibre ottiche anche per sistemi B-WIM, ottenendo risultati precisi riguardo i pesi per asse.

3.6.1 Sensore in fibra ottica basato sull'interferometro di Michelson

Le esperienze condotte mostrano chiaramente che si può effettuare la stima dei carichi statici o dinamici.

Il sensore di pressione dinamico, che sfrutta i principi dell'interferometro, ha costi ridotti e garantisce grande accuratezza.

Cap. 3.7 Vantaggi e svantaggi delle fibre ottiche

Gli aspetti positivi di questo tipo di sensori sono rappresentati dall'opportunità di stimare carichi dinamici reali, dal peso e dimensioni ridotti, dall'indipendenza rispetto fonti elettriche, dalla possibilità di sviluppare reti di rilevamento, dalla velocità di elaborazione, dall'immunità alle interferenze elettromagnetiche, dal basso costo, e dalla grande sensibilità.

Svantaggi sono invece il fatto che ci siano perdite che deformano il segnale d'ingresso e quindi ne riducono la potenza, scarsa accuratezza della stima dei carichi (specie quelli dinamici), grande disturbo meteorologico, cui si è fatto rimedio con l'introduzione di nuovi metodi di calcolo.

Cap. 3.8 Installazione e messa in opera

Queste operazioni rappresentano un momento cruciale, che caratterizzerà le performances e la vita dei sistemi coinvolti (tab.25). Come discusso nel progetto SENTINEL, le fasi dell'installazione riguardano "la creazione di cavidotti, la disposizione di scatole per la giunzione dei cavi, il montaggio di armadi stradali per l'alloggiamento dell'elettronica e la fornitura di sistemi di protezione ambientale a difesa di fenomeni quali: fulminazione, umidità, variazioni di temperatura, infestazioni da insetti e roditori".

Occorre che tutte le operazioni siano eseguite in conformità alle avvertenze date dal produttore, quando il meteo consente la solidificazione delle resine impiegate per l'ancoraggio.

La precisione finale del sistema di pesatura dipenderà per lo più da:

- geometria della strada;
- condizioni della pavimentazione;
- caratteristiche del deflusso.

In particolare, la geometria viene influenzata da:

- raggio di curvatura;
- pendenza longitudinale;
- pendenza trasversale.

Questi requisiti sono stati definiti nel 1999 (azione COST 323 "Weigh-in-motion of road vehicles") (tab.24), Cost association, European cooperation in Science & Technology

Caratteristica	Classe I	Classe II	Classe III
Raggio di curvatura	≥ 1000 m (ma è da preferirsi una strada dritta)		
Pendenza longitudinale	$\leq 1\%$	$\leq 2\%$	
Pendenza trasversale	$\leq 3\%$		

Tabella 24

Tabella 24 - Requisiti geometrici raccomandati

			Classi di installazione W.I.M.		
			I Eccellente	II Buono	III Accettabile
Ormaiamento (3m-beam)		Massima profondità dell'ormaiamento (mm)	≤ 4	≤ 7	≤ 10
Deflessione (quasi statica) 13 t - asse	Pavimentazioni semi-rigide	Deflessione media (10^{-2} mm) Differenza Sinistra/Destra (10^{-2} mm)	≤ 15 $\neq 3$	≤ 20 $\neq 5$	≤ 30 $\neq 10$
	Tutte le pavimentazioni bituminose	Deflessione media (10^{-2} mm) Differenza Sinistra/Destra (10^{-2} mm)	≤ 20 $\neq 4$	≤ 35 $\neq 8$	≤ 50 $\neq 12$
	Pavimentazioni flessibili	Deflessione media (10^{-2} mm) Differenza Sinistra/Destra (10^{-2} mm)	≤ 30 $\neq 7$	≤ 50 $\neq 10$	≤ 75 $\neq 15$
Deflessione (dinamica) 5 t - carico	Pavimentazioni semi-rigide	Deflessione (10^{-2} mm) Differenza Sinistra/Destra (10^{-2} mm)	≤ 10 $\neq 2$	≤ 15 $\neq 4$	≤ 20 $\neq 7$
	Tutte le pavimentazioni bituminose	Deflessione media (10^{-2} mm) Differenza Sinistra/Destra (10^{-2} mm)	≤ 15 $\neq 3$	≤ 25 $\neq 6$	≤ 35 $\neq 9$
	Pavimentazioni flessibili	Deflessione (10^{-2} mm) Differenza Sinistra/Destra (10^{-2} mm)	≤ 20 $\neq 5$	≤ 35 $\neq 7$	≤ 55 $\neq 10$
Regolarità	Indice IRI	Indice (m/km)	0-1.3	1.3-2.6	2.6-4
	APL	Rating (SW, MW, LW)	9-10	7-8	5-6

Nota: I valori di ormaiamento e deflessione sono dati per temperature ≤ 20 °C

Tabella 25

Tabella 25 - Classificazione dei siti per l'installazione dei sistemi W.I.M.

La resistenza dei materiali impiegati può influenzare la precisione delle misure. In generale, se si prevede una sostituzione del manto stradale in tempi brevi, non è vantaggioso installare sistemi W.I.M, infatti con la sostituzione della pavimentazione, anche i sensori vengono danneggiati.

Per quanto riguarda la calibrazione, si effettuano varie misurazioni con carichi conosciuti e varie andature; il tutto avviene in pochi giorni, al fine di assicurare uniformità di meteo. (fig. 64).

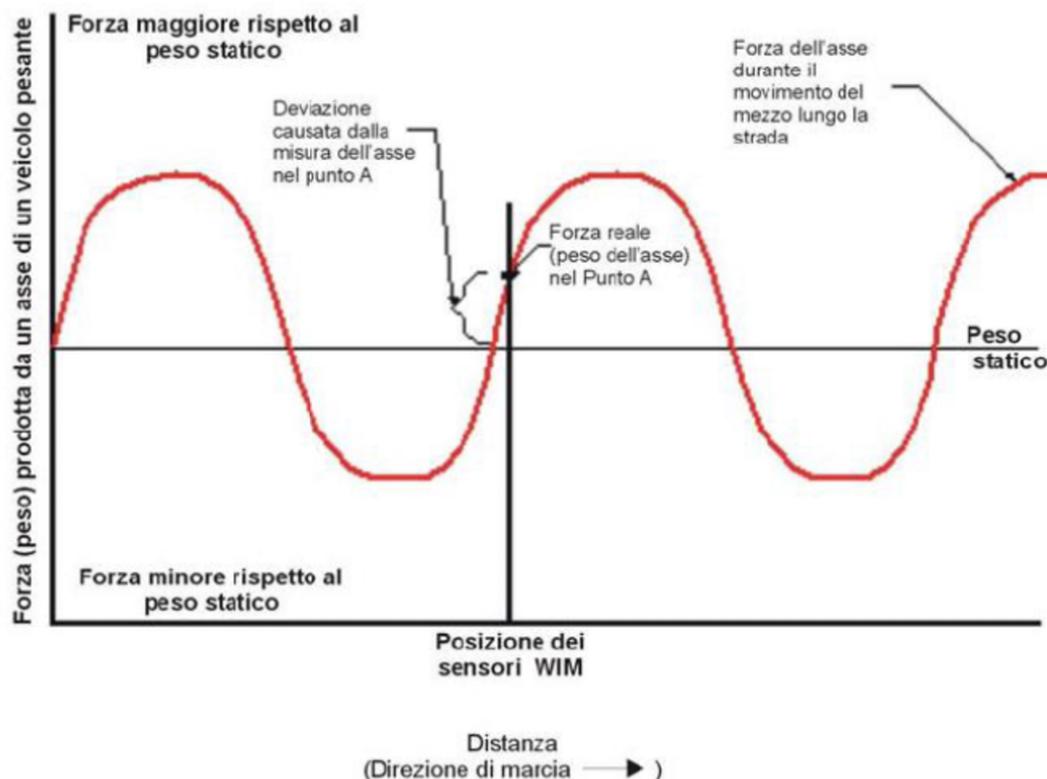


Figura 64

Figura 64 - Curva dinamica caratteristica di un mezzo pesante in seguito ad interazione tra pavimentazione e sospensioni

L'errore è funzione dell'andatura; grazie alla ripetizione dei passaggi, e paragonando la media dei valori ottenuti (in condizione dinamica) al carico statico, si può stabilire il coefficiente che bilancia la differenza di peso generata a causa delle oscillazioni del mezzo. Bisogna in ogni caso considerare che esiste un legame tra le caratteristiche di quel mezzo, dunque conducendo test su un unico mezzo si possono originare degli errori di valutazione (fig. 65).

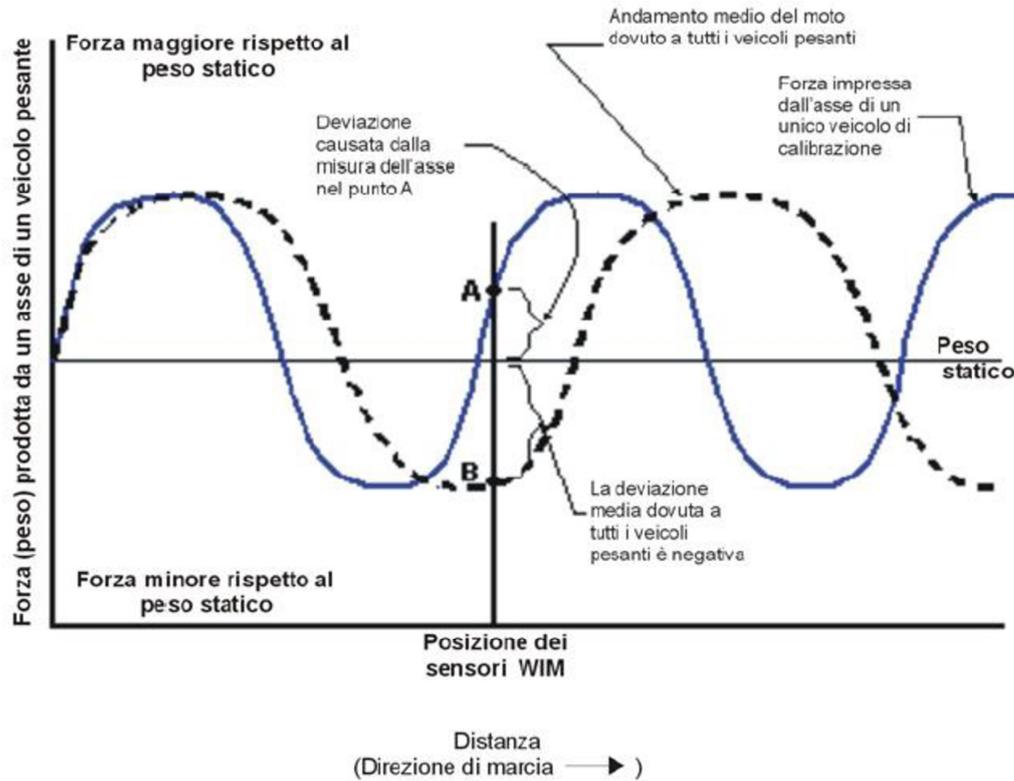


Figura 65

Figura 65 - "Paragone fra curve dinamiche e valore medio dei mezzi impiegati"

Cap. 3.9 Accuratezza

E' data dal rapporto $(W_d - W_s) / W_s$.

W_d rappresenta la sollecitazione esercitata, e W_s il carico statico.

Distinguiamo sei classi di accuratezza (tab.26):

Classe A(5)	Scopi sanzionatori (verifica del superamento dei limiti di peso consentiti);
Classe B+(7)	Scopi sanzionatori, qualora non sia possibile raggiungere i livelli di accuratezza propri della classe A(5)
Classe B(10)	Rilievo accurato del peso assiale, di gruppi di asse e complessivo, per: <ul style="list-style-type: none"> - Progettazione, manutenzione e valutazione dello stato delle infrastrutture (pavimentazioni e ponti) - Preselezione di veicoli in sovraccarico - Identificazione dei veicoli in base al peso
Classe C(15) o D+(20)	Studi statistici dettagliati, determinazione degli istogrammi di carico e classificazione accurata dei veicoli basata sul peso; studi sulle infrastrutture e valutazioni dello stato di usura delle pavimentazioni.
Classe D(25)	Indicazioni sul peso a scopi statistici, studi di tipo tecnico ed economico, classificazione standard dei veicoli in relazione al peso
Classi E(30), E(35), ecc	Definite per quei sistemi che non soddisfano le specifiche della classe D(25). I sistemi appartenenti a queste classi possono essere utilizzati per dare delle indicazioni sulla composizione del traffico e la distribuzione e frequenza di carico.

Tabella 26

Tabella 26 – Definizioni di accuratezza a seconda dell’impiego

Indichiamo di seguito la tolleranza (tab.27):

Campo di applicazione	Tolleranza (%)	
	Minima	Massima
Statistica: studi trasportistici di tipo tecnico ed economico, valutazioni generali del traffico su ponti e strade, censimento dei mezzi pesanti, ecc.	20	30
Infrastruttura e preselezione: analisi dettagliata del traffico, progettazione e manutenzione di strade e ponti, accurata classificazione dei veicoli, preselezione a scopo sanzionatorio.	10	20
Scopi legali: applicazioni sanzionatorie ed industriali (dove consentito dalla legislazione vigente).	5	10

Tabella 27

Tabella 27 - Campi di applicazione e tolleranza

Criteri (Tipi di misura)	Tipo di utilizzo	Classi di Accuratezza Intervallo di confidenza δ (%)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
Peso Totale	Peso Totale > 3,5 t	5	7	10	15	20	25	>25
Peso assiale:	Peso assiale > 1 t							
Gruppo di assi		7	10	13	18	23	28	>28
Singolo asse		8	11	15	20	25	30	>30
Asse di gruppo		10	14	20	25	30	35	>35
Velocità	V>30km/h	2	3	4	6	8	10	>10
Distanza tra gli assi		2	3	4	6	8	10	>10
Flusso totale		1	1	1	3	4	5	>5

Tabella 28

Tabella 28 - Tolleranza per classi di accuratezza

Al fine di determinarne la precisione, occorre considerare le misure presenti in tabella 28. La relativa classe di appartenenza è identificata quando sono soddisfatti i valori minimi delle varie grandezze.

Cap. 3.10 Rilevamento e gestione dati

Per applicazioni di pianificazione, laddove non sia necessaria grande precisione, si esegue in genere un campionamento spaziale ed uno temporale.

3.10.1 Campionamento spaziale

Occorre stabilire delle sezioni caratteristiche, che descrivano le pavimentazioni di interesse. Per stabilire le sezioni si svolge uno studio sui flussi dell'infrastruttura per valutare in maniera corretta le caratteristiche del traffico. La quantità di aree da analizzare va determinata tenendo in considerazione la precisione desiderata e le spese che si possono affrontare. Per stabilire la grandezza del campione occorre considerare tre variabili statistiche:

- Coefficiente di variazione (c.v.), rapporto fra la deviazione standard e la media;
- Statistica Z, confidenza che si vuole ottenere (può variare fra l'80% ed il 95%);

- Errore relativo consentito (e), calcolato come metà dell'intervallo di confidenza fissato moltiplicato per il valore medio del campione (ad esempio $\pm 10\%$).

Si definisce la grandezza del campione, presa da "Progetto SENTINEL", come:

$$n = \frac{n'}{1 + \frac{n'}{N}}$$

"in cui N rappresenta la grandezza della popolazione, invece n' l'estensione del campione non corretta, ottenuta come:

$$n' = \left(\frac{c.v. * z}{e} \right)^2$$

Il coefficiente di variazione invece si ottiene tramite la formula

$$c.v. = \frac{\sigma}{\mu} \approx \frac{s}{x}$$

in cui σ è la deviazione standard e μ la media della popolazione, mentre s rappresenta la deviazione standard e x la media del campione."

3.10.2 Campionamento temporale

Le misure si estendono per un intervallo temporale che permetta di valutare la variabilità del dato. Per considerare tutte le modifiche che possono avvenire durante il giorno e nella settimana, le misure sono prese senza interruzioni per almeno sette giorni. Per misurazioni limitate nel tempo si possono utilizzare postazioni semi-mobili, composte da sensori fissi e rilevatori portatili.

Cap. 3.11 Analisi di mercato

Alcune indagini eseguite negli Stati Uniti dicono che in tutto il globo sono presenti più di un milione e mezzo di dispositivi WIM, che monitorano oltre un milione di corsie, per un dispendio di denaro valutato in circa due miliardi di dollari.

Il sistema maggiormente impiegato per il rilevamento è quello che utilizza le spire induttive, poiché queste hanno un rapporto costi - accuratezza molto favorevole (tab.29).

Tecnologia	Costo medio per unità (\$)	Numero detectors per corsia	Costo medio per corsia (\$)
Spire induttive	1.250	1.44	1.800
Ultrasuono	1.008	0.40	403
Microonda	1.450	0.43	624
Piezo-elettrico	4.300	0.64	2.752
Infrarosso	2.800	0.92	2.572
Video	13.000	0.42	5.460
Magnetico	360	1.04	374
CCTV	19.000	0.50	9.500
W.I.M.	11.800	2.02	23.836
Acustici	4.300	0.37	1.554

Tabella 29

Tabella 29 - Costo medio per tipologia

Sono sempre più utilizzati inoltre strumenti non intrusivi, che si possono installare, togliere, aggiustare in tempi minori rispetto a quelli che invece vengono annegati nella pavimentazione, senza la necessità di bloccare il transito dei veicoli.

Cap. 3.12 Studi e ricerche sui W.I.M.

Come indicato nel progetto SENTINEL, nel 2013 un gruppo formato da Enti governativi polacchi, Università, Istituti di ricerca e aziende commerciali, ha raccolto le proprie ricerche allo scopo di determinare i migliori metodi per l'impiego dei WIM.

Lo scopo principale dello studio era la definizione minuta dell'iter per la legalizzazione ed la verifica di questi sistemi, ed i parametri di qualità che questi devono rispettare.

Ad oggi comunque non esiste uno standard per la valutazione degli errori (ad esempio in Polonia la tolleranza riguardo il peso lordo, per un veicolo corrisponde a 40 t – fig. 66).

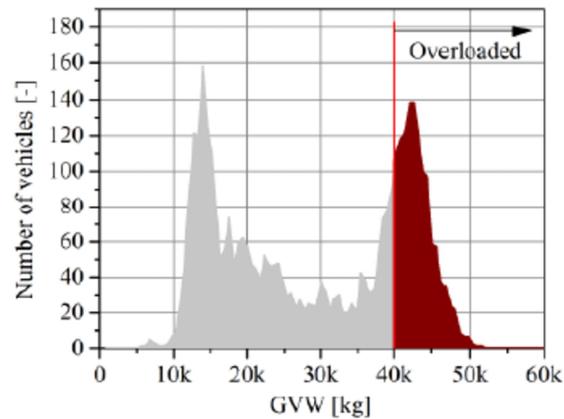


Figura 66

Figura 66 - Distribuzione della quantità di mezzi per il carico

Il carico tollerato va incrementato di un valore corrispondente all'errore del sistema. Ciò si rende indispensabile per prevenire la possibilità che un mezzo caricato entro i limiti previsti dalla legge sia fermato perché considerato in sovraccarico.

Nella figura che segue (fig. 67) si può notare il differente grado di accuratezza (2% e 10%) per due differenti sistemi riguardo la quantità di mezzi in sovraccarico (peso lordo superiore a 40 tonnellate).

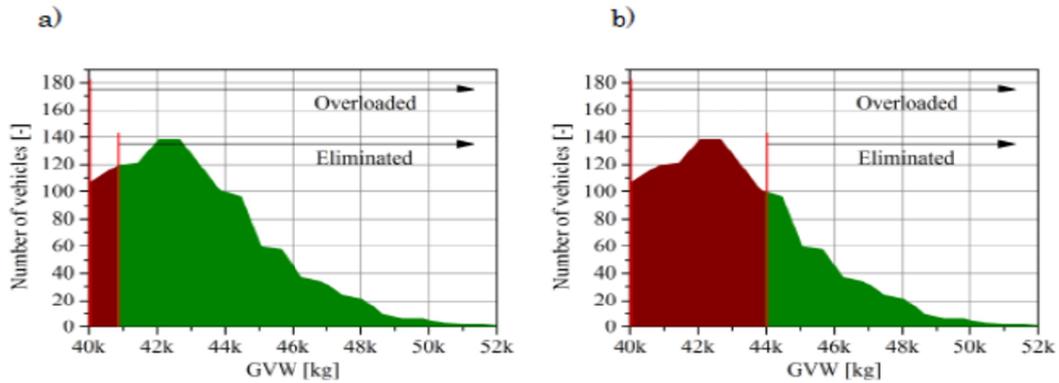


Figura 67

Figura 67 – Precisione del sistema riguardo l'eliminazione dei mezzi in sovraccarico: a) errore al 2%, b) errore al 10%

Per assicurare l'affidabilità, è necessario che non si vada oltre l' 1 o 2% di errore.

Per stabilire i parametri di questo tipo di sistemi si deve:

- definire la quantità di sensori e la disposizione;
- definire tutte le cause di perturbazione;
- definire gli intervalli consentiti di queste cause. Se i valori sono tutti rispettati, il grado di incertezza delle analisi viene considerato ammissibile;
- ricercare metodi che assicurino la precisione voluta.

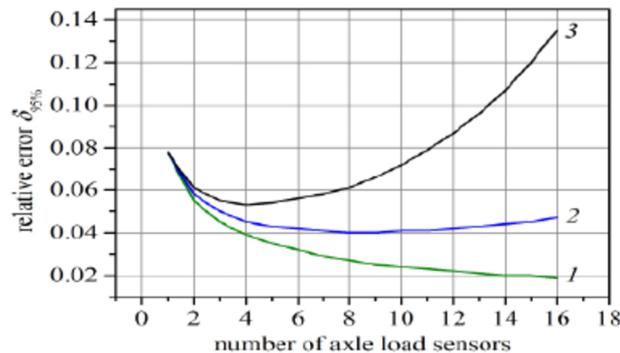


Figura 68

Figura 68 – Influenza della quantità di sensori sull'errore del sistema.

Osserviamo come nei casi 2 e 3 si ottiene il valore minore di errore ($\delta_{95\%}$) in base alla quantità di sensori (fig. 68). Con il raggiungimento di questo minimo, un

incremento nella quantità di sensori impiantati comporta contestualmente un incremento dell'errore.

Una ulteriore e rilevante problematica si deve alla alta suscettibilità alle condizioni ambientali, a quelle meteorologiche, e altre cause che sono da imputare ai mezzi ed alla loro interazione col sistema.

Cap. 3.13 Stato dell'arte delle soluzioni di ricezione e trasmissione dati raccolti dal sistema W.I.M.

Bisogna occuparsi anche di stabilire il modo in cui i dispositivi di misura e il sistema di raccolta dati comunicano fra loro, ed anche dell'interazione tra sensori ed il sistema centrale. La scelta ricade tra comunicazioni wireless o wired; non si può stabilire a priori una soluzione perfetta in generale, ma occorre effettuare delle valutazioni caso per caso.

Cap. 3.14 Architettura a BUS (Basic Utility System)

Un unico BUS permette il collegamento di più dispositivi tra loro. I diversi sensori hanno un collegamento diretto col controllore; ci sono tuttavia alcuni svantaggi, tra i quali l'installazione di una grande quantità di cavi.

Cap. 3.15 Wireless Sensor Network

Le reti wireless rappresentano un differente modello; si parla in questo caso di Wireless Sensor Network (WSNs). Questo tipo di rete è composta da un gruppo di apparecchi capaci di raccogliere informazioni dall'esterno e di interagire fra essi in autonomia (fig. 69): un gruppo di nodi wireless collegati insieme, con poca RAM e una CPU dalle prestazioni modeste.

Queste reti possono essere viste come mini computer che operano congiuntamente al fine di creare una rete espansa.

I vari nodi compiono la propria attività attraverso 4 fasi:

1. ottenimento delle informazioni;
2. analisi dei dati;
3. raccolta;
4. invio dei risultati elaborati.

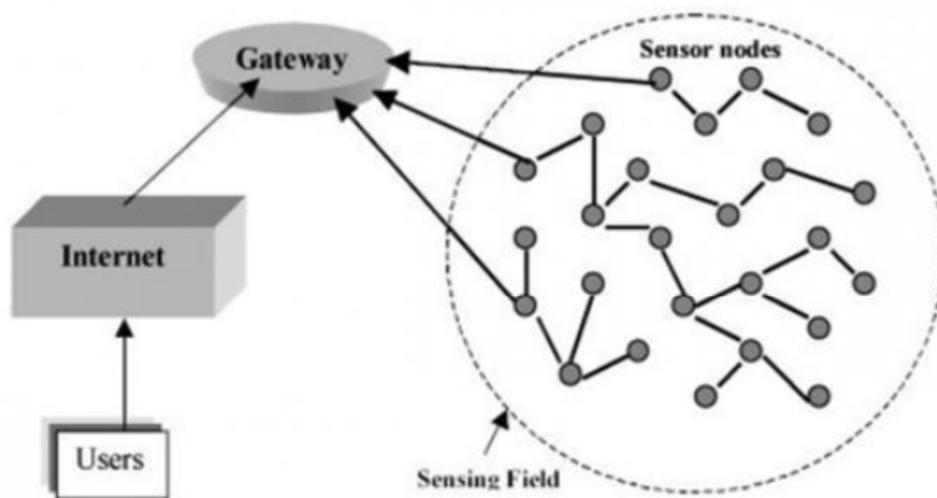


Figura 69

Figura 69 - Wireless Sensor Network (WSN)

Cap. 3.16 Nodo Sensore (mote)

L'unità base della WSN è il nodo sensore; questo nodo sensore è identificabile ad un dispositivo dalle dimensioni contenute, autonomo e dai bassi consumi.

Il nodo sensore è composto da:

- una o più unità di misurazione;
- una unità di analisi;

- una unità di trasmissione.

In una fase posteriore i dati vengono trasmessi al Gateway; tramite esso si può collegare il network (composto dai nodi) al server. In questo modo altri apparecchi possono accedere alla rete, ed al tempo stesso è assicurato un certo grado di protezione.

Cap. 3.17 Internet Of Things (IOT)

Di recente è stato elaborato un nuovo tipo di WSN; Internet of Things è una rete formata da dispositivi associati in maniera univoca ad un ID, che tramite una connessione locale alla rete sono in grado di trasmettere le informazioni in maniera autonoma. Ogni nodo trasmette indipendentemente le proprie informazioni raccolte su internet, avendo la possibilità di essere connesso; a differenza dei WSN, scompare la necessità di routing.

La rete IoT è formata da quattro elementi base (fig. 70): sensori, devices, gateways e internet (cloud).

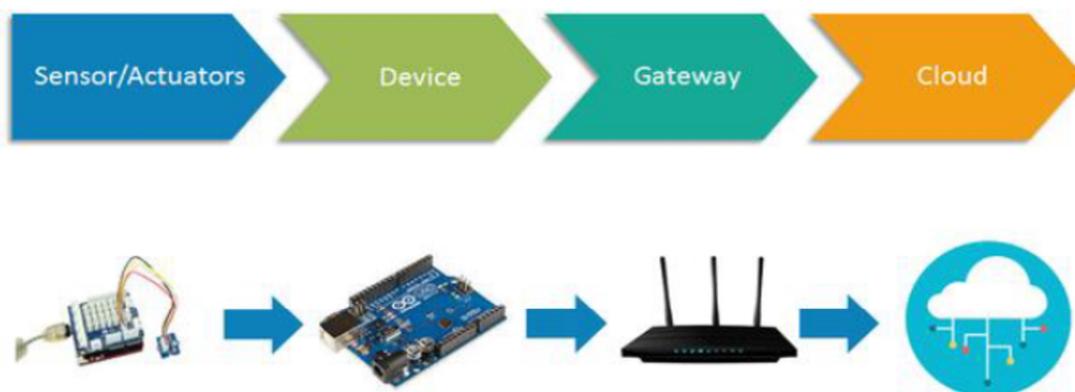


Figura 70

Figura 70 – Elementi della rete IoT

Cap. 3.18 Raccolta, analisi e uso dei dati

Caratteristiche generali di questi sistemi sono la pre-elaborazione locale dei dati, un sistema di riconoscimento automatico delle targhe e documentazione fotografica integrata, l'identificazione della dimensione del veicolo, una segnaletica automatica per la preselezione (cosa che però richiede una normativa ad-hoc per l'Italia), la possibilità di una verifica manuale in tempo reale tramite PC o tablet, l'analisi in post-produzione, dei sensori di forza che traducono il peso in segnale elettrico (Guide for Users of Weigh-In-Motion. An introduction to weigh-in-motion”).

Dati riguardanti velocità, lunghezza, distanza fra gli assi, peso totale, per singolo asse e per singola ruota, classificazione del veicolo, sbilanciamento fra lato destro e sinistro, gonfiaggio dei pneumatici, occupazione della corsia e senso di marcia sono alcuni degli elementi che vengono registrati ed analizzati da questo tipo di sistemi, con un'accuratezza dell' 85% nel caso servano per un'analisi statistica, e del 95-98% in caso di utilizzo per sanzionamento diretto o pagamento di pedaggio.

Inoltre, tramite un data logger si può integrare un sistema “KI” (acquisizione di immagini e software di analisi dati) a parti terze (es. ANAS).

Se vengono utilizzati sensori al quarzo, si può disporre di alta precisione (individuazione ruota singola o coppia, anche a cavallo fra le corsie), e la conversione analogico-digitale dei carichi avviene direttamente nel sensore; questi sensori sono collegati direttamente ad un cavo LAN, e non necessitano di un data logger.

La richiesta delle postazioni WIM serve a soddisfare l'esigenza di:

- acquisizione informazioni sui veicoli che transitano
- rilevamento infrazioni
- pedaggio autostradale (attivo ad esempio in Cina, India, Bangladesh)
- pesatura industriale (nelle aree logistiche)

- protezione infrastrutture (ponti, viadotti etc.)
- altri servizi, tra cui:
 - supporto alla progettazione stradale per definire la tipologia e la profondità delle sezioni di pavimentazione
 - determinazione della programmazione degli interventi di manutenzione
 - allocazione dei costi
 - determinazione dei costi di congestione ed eventuale valutazione di nuovi bracci stradali
 - definizione di una classe di attenzione
 - sorveglianza delle classi considerate a maggior rischio
 - determinazione del tempo di vita dell'infrastruttura (il danneggiamento dell'infrastruttura, come detto in precedenza, è legato alla 4^a potenza del peso per asse, ed in particolare, superare le 40t di peso danneggia in maniera severa l'infrastruttura – oggi i modelli di calcolo per i carichi sono spesso molto conservativi rispetto ai dati reali)
 - analisi generale e monitoraggio continuo
 - capire la correlazione causa effetto tra carichi e danneggiamento dell'infrastruttura
 - deviare il flusso dei mezzi più pesanti su infrastrutture a minor rischio (questa possibilità non è ancora attiva in Italia per motivi legislativi)

I dati che un Sistema di questo tipo può fornire sono (per veicolo):

- Numero identificativo unico
- Data e ora del rilevamento

- Localizzazione: strada, direzione, corsia
 - Tipo di veicolo (camion, van, macchina, motociclo, ecc., e classe in base ad una data classificazione)
 - Velocità
 - Lunghezza totale e lunghezza interasse
 - Numero di assi
 - Peso lordo e carico sugli assi
 - Distanza tra gli assi
- E a volte
- Peso per sensore (se ne vengono installati più di uno per corsia)
 - Larghezza o distanza tra le gomme su un asse
 - Localizzazione laterale della gomma
 - Coefficiente di calibrazione del sensore WIM
 - Numero di licenza
 - Codice di errore (per convalidare o eliminare una misurazione)

Cap. 3.19 Dati aggregati (per periodo di tempo):

Ovviamente è necessario stabilire a priori una classificazione per i veicoli, per impostare il sistema WIM; normalmente ogni Paese utilizza una o più classifiche per definire i veicoli: in Italia possiamo trovare la classificazione del CNR (tab.30), che individua 16 categorie di mezzi pesanti, oppure quella del pedaggio autostradale (fig. 71), dell'ANAS, o dell'Istat.

Tipo di veicolo	N. Assi	Distribuzione carichi per asse in KN			
autocarri leggeri	2	∇10		∇20	
autocarri leggeri	2	∇15		∇30	
autocarri medi e pesanti	2	∇40		∇80	
autocarri medi e pesanti	2	∇50		∇110	
autocarri pesanti	3	∇40		∇80	∇80
autocarri pesanti	3	∇40		∇100	∇100
autotreni e autoarticolati	4	∇40	∇90	∇80	∇80
autotreni e autoarticolati	4	∇60	∇100	∇100	∇100
autotreni e autoarticolati	5	∇40	∇80	∇80	∇80
autotreni e autoarticolati	5	∇60	∇90	∇90	∇100
autotreni e autoarticolati	5	∇40	∇100	∇80	∇80
autotreni e autoarticolati	5	∇40	∇110	∇90	∇90
mezzi d'opera	5	∇50	∇120	∇130	∇130
autobus	2	∇40		∇80	
autobus	2	∇60		∇100	
autobus	2	∇50		∇80	

Tabella 30

Tabella 30. Classificazione CNR



Figura 71

fig. 71. Classificazione per tariffe autostradali

I dati aggregati riferiti a brevi periodi (10min, 1h) vengono utilizzati allo scopo di ottenere dati sui flussi in real time, quelli di lungo periodo (1mese, 1 anno) invece per monitoraggio, manutenzione delle strade, o a fini statistici.

Tra gli altri:

- Classificazione del traffico (% dei veicoli per tipo nel tempo)
- Classificazione del flusso (numero medio dei mezzi e degli assi di un dato tipo per unità di tempo)
- Istogrammi dei dati collezionati (tipo/classe di veicoli, velocità, lunghezza o interasse, peso lordo o carico su asse, ecc.)
- Media, deviazione standard, percentili di ogni dato

Le informazioni generate dai WIM possono essere utilizzate direttamente per valutare il deterioramento causato dai mezzi in sovrappeso e lo stress indotto dal traffico. Infatti una sottostima dei flussi di traffico può portare ad una sovrastima della vita di servizio e di conseguenza ad un cedimento strutturale precoce ed inaspettato.

Un controller di sistema WIM in genere conserva dati di riepilogo e dati del veicolo per ogni giorno. I dati giornalieri sui veicoli sono raggruppati generalmente per ora del giorno, corsia, classificazione e range di velocità. I dati sui singoli veicoli invece possono avere dei parametri definiti dall'utente, come una classificazione, o una soglia di peso per l'asse anteriore; a volte questi dati vengono registrati come "Per Vehicle Records" (PVRs) o "Truck Records".

Nel caso di soglia singola, ogni ruota o coppia di ruota è pesata singolarmente. Per i sensori sfalsati, la velocità di un veicolo viene calcolata in base al tempo impiegato dalle ruote di ciascun asse per colpire i sensori anteriori e posteriori. Per sensori in linea (affiancati), la velocità può essere calcolata con uno dei due metodi seguenti:

1. Un sensore dell'asse (non di pesatura) può essere installato a valle di quelli per il controllo del peso, e la velocità viene calcolata in base al tempo che impiegano le ruote di ciascun asse a passare dai sensori di peso al sensore che sta a valle.

2. Se non è installato alcun sensore d'asse, la velocità viene calcolata in base al tempo che intercorre tra il passaggio da parte del veicolo sui sensori anteriori e posteriori. Questo non è accurato come il primo metodo.

Nel caso di doppia soglia, le ruote destra e sinistra o la coppia di ruote di ciascun asse viene pesata due volte dai sensori. Il sistema riporta un singolo peso sinistro e un singolo peso destro per ciascun asse. La velocità di un veicolo viene calcolata in base al tempo impiegato dalle ruote di ciascun asse per colpire i dispositivi di peso anteriori e posteriori.

In Nord America esiste un programma di studio di lungo termine sulle pavimentazioni (Long-Term Pavement Performance o LTPP) , che si occupa di estendere la vita utile delle pavimentazioni valutando l'uso di differenti materiali per differenti carichi di traffico, condizioni ambientali e terreni di sottofondo. Vengono valutate anche differenti pratiche di manutenzione. (<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/ltppl/>)

Tra le cause principali di dati non validi abbiamo: malfunzionamento dei componenti del sistema o impostazioni del sistema errate; interruzione del ciclo; algoritmo di classificazione; fattori di calibrazione; condizioni del sito (pavimentazione ruvida, geometria della carreggiata); condizioni del traffico (congestione, chiusura o cambio della corsia); cambio di corsia durante l'attraversamento dei sensori; condizioni meteorologiche (umidità presenza di ghiaccio o neve); vento laterale

Tra gli elementi che influenzano la qualità dei dati WIM, ma che possono essere controllati, ci sono: le condizioni del sito; la qualità delle apparecchiature e capacità prestazionali; l'installazione delle apparecchiature e la loro manutenzione ordinaria; la manutenzione della pavimentazione

Fattori che non possono invece essere controllati e che influenzano la qualità dei dati WIM: pneumatici non circolari; ruote dinamicamente sbilanciate; pressione dei pneumatici; sospensioni del veicolo; vento; caratteristiche aerodinamiche del veicolo; tipo di carico (in particolare se liquido, e/o come il mezzo viene caricato); accelerazione/decelerazione; condizioni di traffico indesiderate dovute a condizioni meteorologiche o lavori sulla carreggiata.

Il codice "misurazione non valida" deve essere assegnato a qualsiasi veicolo quando: i pesi delle ruote sinistra e destra di qualsiasi asse presentano una differenza del 40% o più; uno dei pesi delle ruote di tale asse supera 2,0 kip (circa 9KN). Entrambi i valori devono essere programmabili dall'operatore. Anche le misure di peso possono essere affette da errori e variare significativamente.

In particolare la generazione di pesi errati può essere causata da: un sensore di pesatura malfunzionante; uno o più fattori di calibrazione chiaramente errati; camion che non viaggiano all'interno delle linee di corsia; forti venti trasversali; effetti di temperature molto basse sui sensori o sull'elettronica.

Diverse agenzie convalidano i dati WIM utilizzando programmi software di proprietà, che contrassegnano qualsiasi veicolo non sia conforme alle regole definite dall'utente in appositi registri e generano rapporti di riepilogo sui veicoli contrassegnati. Un esempio può essere il "Travel Monitoring Analysis System" (TMAS). TMAS è attualmente utilizzato per inviare dati mensili sul volume di traffico a FHWA e sarà utilizzato anche per inviare dati sulla classificazione dei veicoli e sul peso dei camion a FHWA, sostituendo il "Vehicle Travel Information System" (VTRIS).

Cap. 3.20 Stato dell'arte in Europa ed in Italia

I dati riguardanti la diffusione dei sistemi WIM sul territorio europeo sono scarsi e "datati"; nel 2002 COST 323 aveva raccolto informazioni sui sistemi in funzione in diversi paesi (fig. 72), e nel report del 2015 "Heavy-Duty Vehicle Weight Restriction in the EU", di Ales Znidaric, l'autore, in maniera informale, parlando con esperti WIM di varie nazioni, ha ottenuto indicazioni parziali (fig. 73).

SOURCE COST 323, 2002

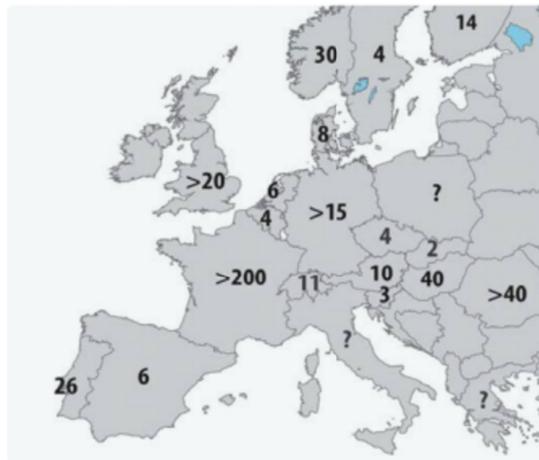


Figura 72

fig. 72 – sistemi WIM funzionanti nel 2002 nel continente europeo

		Austria	Switzerland	UK	Netherlands	Spain	Slovenia	Sweden	Croatia	Finland	France
Permanent	Motorways	5	8 (4 planned)	34	20	14			2		26
	Other roads			45	some	4					3
Mobile	Motorways	3					16				
	Other roads	8					40	19	90	6	
Low-speed WIM for enforcement		0	0	0	0	0	0				3
Data used for	traffic studies	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	pavements	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	bridges	yes	yes?	yes	yes		yes	no	no		yes
	pre-selection	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no	yes		yes
Dominant technologies		B-WIM bending plates	piezo-quartz	piezo-polymer	piezo-quartz	piezo-ceramic piezo-polymer	B-WIM	B-WIM	B-WIM	B-WIM	piezo-quartz piezo-ceramic
Direct enforcement with WIM		no	no	no	no	no	no	no	no	not-known	Feasibility checks
Changes of EU Directive 96/53/EU		no!	not-known	not-known	not-known	reluctant	not-known	not-known	not-known	not-known	not-known

Figura 73

fig. 73 – diffusione WIM in Europa nel 2015

Indipendentemente da ciò, il mercato europeo dei sistemi WIM è in forte espansione, e, secondo il report “Europe Weigh in Motion System Market”, si prevede un tasso di crescita composto annuo - CAGR - del 7% circa, per una valutazione complessiva di 597 milioni di USD alla fine del 2030. Infatti le iniziative che i governi stanno intraprendendo per dotare le città europee di sistemi intelligenti di trasporto aprono le

porte ai vari sistemi WIM, in grado di soddisfare questa necessità. Francia, Germania e Regno Unito sono leader in questo settore.

La Germania guida il mercato europeo, contribuendo ad esso per un valore di 107 milioni di USD nel 2021; in Gran Bretagna i sistemi WIM sono impiegati nelle pavimentazioni stradali, nei ponti e nelle ferrovie. Nonostante i fattori negativi che questi sistemi presentano (accuratezza e costi), i vantaggi sono molteplici e includono l'identificazione del veicolo, il monitoraggio in tempo reale, il controllo automatico della segnaletica semaforica per ridurre la congestione.

Nelle tabelle seguenti (tab.31 e 32) alcune caratteristiche delle tecnologie WIM (dati estratti da "A I Dontu et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 997 012113").

Characteristics		Piezo-polymer	Piezo-quartz	Bending plate	Single load cell
Accuracy at high speed (GVW for 95% confidence)		±15% [8,25,34,35]	±5% [36] ±10% [8,34,36] ±12% [18]	±10% [34,35,37]	±5% [37] ±6% [8,25,35]
Expected life (years)		1-3 [25] 4 [38,39]	3-5 [25] 6 [38]	6 [8,25,35,39] 6-8 [25] Minimum 10 [38] 12 [37]	10-12 [25] 12 [35,39] 12 and more (after major refurbishing work) [25] 15 [37] 20 [38]
Equipment cost/lane (\$)		13,500 [40] 9,000 [8]	29,000 [40] 20,000 [8] 12,000 [38,39,41]	18,900-21,500 [8,39,40,41]	48,700-52,500 [8,39,40,41] 39,000 [38]
Initial installation cost/lane (\$)	Lane closure [40]	10,000	20,000	40,000	60,000
	Labour	4,000-6,500 [25,38,40]	16,000-24,000 [25] 12,000 [38,40]	18,000-28,000 [25] 13,500 [38,40]	44,000-53,000 [25] 20,800 [40]
Annual maintenance and operation costs/lane (\$)		5,000 [8]	High [8,42]	6,000 [8]	8,000 [8]
Speed (km/h) [38,43]		48-160	48-160 15-150	16-160 5-200	16-160
Sensitivity		High	High to road roughness	Medium	Medium
Reliability		Low	Medium	Medium	High

Tabella 31

tabella 31. Caratteristiche WIM e costi stimati

WIM System	Estimated annual average cost/lane (\$)
Piezo-polymer	4,224 [41]; 4,750 [38,39]; 5,917 [44]
Piezo-quartz	7,500 [38]
Bending plate	4,990 [41]; 6,400 [38,39]; 6,750 [44]
Double bending plate	7,709 [41]
Single load cell	6,200 [38]; 7,296 [41]; 8,300 [39]; 8,750 [44]

Tabella 32

tabella 32. Costo medio stimato per corsia per periodo di vita di 12 anni

Si stanno studiando inoltre nuovi metodi per utilizzare la tecnologia WIM nei centri urbani (fig. 74), dove per le caratteristiche stesse del traffico il funzionamento di questi sistemi è svantaggiato; un esempio ci viene dall'università "Gheorghe Asachi" di Iasi, Romania, in cui è stato progettato un sensore per uso esclusivo in ambito urbano, facile da installare e da rimuovere.

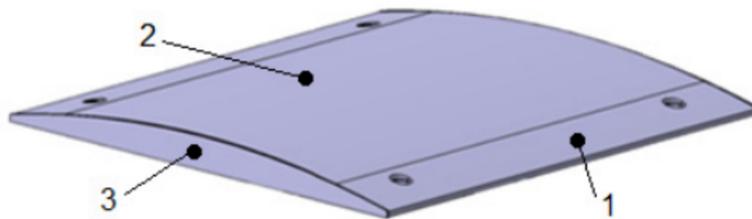


Figura 74

Figura 74. Sensore WIM per traffico urbano: 1-piastra a base rigida; 2-piastra flessibile; 3-copertura

In Italia, questi sistemi sono ancora pochi e i luoghi in cui sono installati non sono noti; tre esempi, ritrovati in rete, riguardano l'installazione di un B-WIM vicino la città di Brescia, uno lungo l'autostrada Venezia-Padova e uno vicino l'uscita autostradale Firenze Nord.

Cap. 3.21 Valutazione dell'impatto architettonico e ambientale dei differenti sistemi W.I.M.

E' possibile "rafforzare" i sistemi W.I.M. per mezzo di dispositivi ottici, che registrano il mezzo grazie a telecamere intelligenti, posizionate a lato e dopo i sensori. Queste sono ovviamente a colori, poiché questo è un elemento fondamentale per stabilire

con precisione il veicolo, al pari del profilo, della targa, e di scritte potenzialmente presenti.

Stimare l'impatto sulle condizioni ambientali generato dal carico oltre i limiti dei mezzi pesanti è abbastanza complicato.

Lo sviluppo di nano tecnologie e dell'elaborazione del segnale digitale ha permesso di integrare nuove tecniche di rilevamento con i materiali strutturali per creare nuove tecnologie multifunzionali; ad esempio oggi è possibile produrre pavimentazioni "intelligenti" capaci di rilevare i carichi in autonomia allo stesso costo delle normali pavimentazioni, in cui il rilevamento è affidato a nanofiller. Un importante vantaggio di questo nuovo tipo di pavimentazioni consiste nell'alta durabilità meccanica e nella sostenibilità ambientale; inoltre queste pavimentazioni sono più facili da installare, richiedono meno manutenzioni e possono essere meno costose da implementare rispetto alle tradizionali reti di sensori. L'effetto che questo tipo di soluzioni produce su ambiente ed architettura è di molto inferiore ad i sistemi tradizionali, oltre al fatto che è possibile posizionare i nuovi sistemi in luoghi che sono soggetti a temperature anche non convenzionali.

In sintesi, una lista di quelle attività e di quei fenomeni che vengono influenzati (o possono potenzialmente esserlo) dall'introduzione dei sistemi W.I.M. sulle strade di tutto il globo.

Cap. 3.22 Modifica del comportamento del trasportatore

Comunicare con le società di trasporto pare essere la giusta direzione per spingere, lentamente, il trasportatore a correggere le proprie abitudini. Abbiamo in questo senso, in Francia e nei Paesi Bassi, alcuni esempi pratici sul campo.

Cap. 3.23 Protezione delle infrastrutture

Per quanto riguarda gli ammaloramenti della pavimentazione, molti studi, effettuati ad intervalli diversi (settimane, mesi, anni) sono stati in grado di dimostrare la

correlazione fra il degrado della pavimentazione ed i mezzi con carico eccessivo in presenza di sistemi WIM. In pratica, è stata misurata la variazione del danno precedentemente all'installazione del sistema di rilevazione e negli anni successivi; per la valutazione quantitativa si procede col calcolo degli ESAL (Equivalent Single Axle Load) ("Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment (DIVINE project)).

Cap. 3.24 Sicurezza stradale

Analizzando vari casi, ci si è resi conto che i trasportatori potrebbero aver iniziato a transitare su strade diverse per non incontrare i sistemi WIM. Questo comporta un incremento del rischio di sinistri sui percorsi secondari. In particolar modo in Norvegia la situazione sembra essere grave, poiché i percorsi non principali non sono stati progettati per il passaggio di mezzi pesanti.

Cap. 3.25 Controllo del traffico

Tramite questi sistemi è possibile ottenere ad esempio l'immagazzinamento di dati sul traffico in tempo reale, il controllo delle merci pericolose, l'analisi della congestione e molti altri elementi.

Cap. 3.26 Pianificazione dei trasporti

Questi sistemi sono di particolare sostegno alle maggiori compagnie, poiché aiutano ad individuare le strategie migliori per quel che concerne la distribuzione degli articoli sui mezzi.

Bibliografia

- International Society for Weigh-In-Motion
- "WIM Data Analyst's Manual" Publication No. FHWA-IF-10-018

- “Stato dell’arte dei sistemi di pesatura dinamica nella gestione di smart road”; progetto SENTINEL
- “Optimal System Design for Weigh-In-Motion Measurements Using In-Pavement Strain Sensors”, Zhiming Zhang, Ying Huang, Raj BridgelallRaj, Muath A Al-Tarawneh, Pan Lu; Article in IEEE Sensors Journal PP(99):1-1
- “CEDR Contractor Report 2018-06”, Aaron Barrett, Emma Benbow, Alex Wright; Transnational CEDR Transnational Road Research Programme Call 2013: Ageing Infrastructure - HiSPEQ, RE-GEN and X-ARA projects – Giugno 2016
- Cost association AISBL, European cooperation in Science & Technology. COST, Guidelines, Version January 2018
- “Sistemi di monitoraggio del traffico, linee guida per la progettazione”, Pasquale Cialdini et al.; Ministero dei Lavori Pubblici Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale
- “Guide for Users of Weigh-In-Motion. An introduction to weigh-in-motion”, Hans van Loo and Aleš Žnidarič; International Society for Weigh-in-Motion, Version:1.1, May 2019
- “Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods”, ASTM-E1318-09, 2009. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- “EUROPEAN SPECIFICATION ON WEIGH-IN-MOTION OF ROAD VEHICLES (COST323)”, Basima Jacob (University of Duhok), Eugene J. O'Brien (University College Dublin)
- “Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report of the COST 323 Action”. Jacob, B., OBrien, E.J., Jehaes, S. (Eds.), Paris: LCPC.
- “Weight-in-Motion of Road Vehicles”, COST 323 Final Report, Appendix 1, European W.I.M. Specification. Version 3.0, August 1999

- “Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment (DIVINE project), Final Report”, DIVINE, 1998. DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL: OECD Scientific Expert Group IR6.

Cap. 4 Un nuovo modello per la progettazione

Per sfruttare tutti questi dati a disposizione i ricercatori hanno ideato un nuovo modello, meccanicistico - empirico, utilizzato in una nuova guida per la progettazione della pavimentazione (MEPDG), sviluppata nell'ambito del progetto 1-37A del Programma nazionale cooperativo di ricerca autostradale (NCHRP), per prima adottata e pubblicata da AASHTO. La nuova procedura offre infatti diversi miglioramenti rispetto alla vecchia guida, e cambia sostanzialmente il modo in cui viene eseguita la progettazione.

Tra i parametri di input che influenzano le prestazioni della pavimentazione troviamo per l'appunto il traffico, ma anche il clima, la struttura della pavimentazione e le proprietà dei materiali; applicando i principi della meccanica ingegneristica si riescono a prevedere le risposte critiche della pavimentazione (fatica, formazione di buche, rotture termiche), e si dà una mano nella valutazione dell'affidabilità di progetto, oltre che nell'analizzare le condizioni della pavimentazione attuale ed evidenziare eventuali carenze nel design precedente.

Nella tabella sottostante (tab.33), estratta da “Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements” di Margarita Martinez Diaz, troviamo rappresentati i principali output restituiti dal MEPDG per le pavimentazioni flessibili:

BEHAVIOR CRITERIA	ROAD TYPES	USA UNITS	VALUE	SI UNITS	VALUE
Alligator cracking	Interstate	% of lane area	10	% of lane area	10
	Primary		20		20
	Secondary		35		35
Permanent deformation	Interstate	inches (in)	0.40	cm	1.02
	Primary		0.50		1.27
	With $s < 45$ mph (72.5 Km/h)		0.65		1.65
Longitudinal cracking	Interstate	feet/mile (ft/mile)	500	m/Km	94.70
	Primary		700		132.58
	Secondary		700		132.58
Transverse cracking	Interstate	feet/mile (ft/mile)	500	m/Km	94.70
	Primary		700		132.58
	Secondary		700		132.58
IRI	Interstate	inches/mile (in/mile)	160	m/Km	2.53
	Primary		200		3.16
	Secondary		200		3.16

Tabella 33

Tabella 33. Principali output di MEPDG per pavimentazioni flessibili e valori di soglia raccomandabili

Avendo centinaia di nuove variabili e parametri che caratterizzano i materiali, MEPDG rappresenta tuttavia un sistema molto più complesso, che richiede molta ricerca, e presenta quindi una sfida per i progettisti delle pavimentazione.

Come si apprende in “Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird’s-eye view”, di Qiang LI1, Danny X. XIAO, ed altri, progettare utilizzando il MEPDG richiede tre macro-fasi (fig.75): la prima consiste nel valutare i valori da inserire nel modello; nella seconda si affronta un’analisi strutturale e delle performance di una sezione di prova (da questa si ottiene un progetto strutturale della pavimentazione); nell’ultima fase si valutano alternative strutturali valide, come l’analisi ingegneristica e l’analisi del costo del ciclo di vita della pavimentazione.

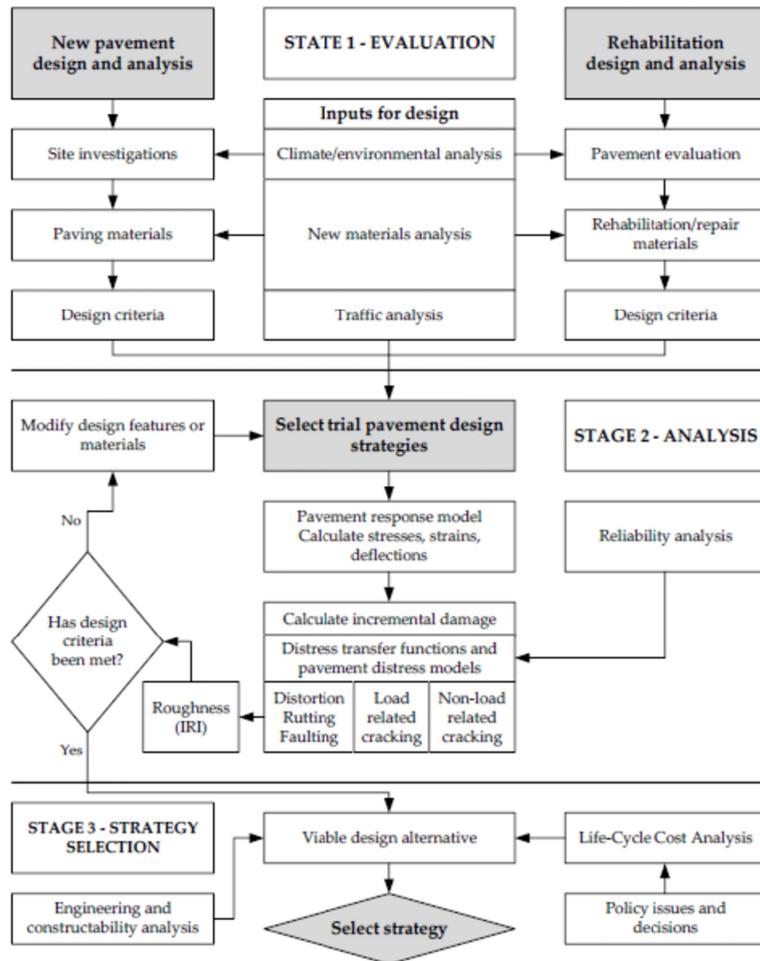


Figura 75

Fig. 75 Schema in 3 fasi del processo MEPDG

Seguendo questo modello, la performance di una pavimentazione viene valutata tramite la seguente formula, presente in “ARA Inc., Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, Champaign, 2004.”

$$S(t) = S_0 + (a_1 S_{D(t)1} + \dots + a_n S_{D(t)n}) + b_j S_j + c_j M_j$$

in cui $S(t)$ è la levigatezza della pavimentazione in un determinato istante t ;

S_0 la levigatezza iniziale dopo la costruzione;

S_d il cambio di levigatezza dovuto all' i -esimo danno ad un dato tempo t ;

a_i , b_j e c_j sono delle costanti;

S_j il cambio di levigatezza dovuto a fattori del sito (sottofondo ed età);

M_j il cambio di levigatezza generato dalla manutenzione.

Cap. 4.1 L'approccio degli spettri di carico – casi di studio

Sfruttando il nuovo modello MEPDG, molte nazioni sono passate dal progettare le pavimentazioni seguendo il metodo “ESA” (Equivalent Standard Axles), in cui si considera il numero di passaggi di un singolo asse standard, a quello degli spettri di carico, in cui si considera il contributo di molti veicoli o le diverse configurazioni di carico d'asse.

In Australia è stato condotto uno studio (Integrating Weigh-In-Motion data with Mechanistic Pavement Analysis and Design, di Wardle; Leigh J. e Cropley; Stephen M.) per facilitare l'integrazione dei sistemi WIM col nuovo modello, utilizzando in particolare i sistemi “HIPAVE” e “WIM Net”; questo sistema permette l'esportazione dei dati collezionati dai WIM in formato XML, i quali vengono direttamente forniti al software di progettazione “HIPAVE” per la loro utilizzazione in campo ingegneristico.

Nel grafico che segue (fig. 76) si può osservare un esempio di Fattore di danno, ottenuto usando l'opzione di analisi degli spettri di carico col software HIPAVE

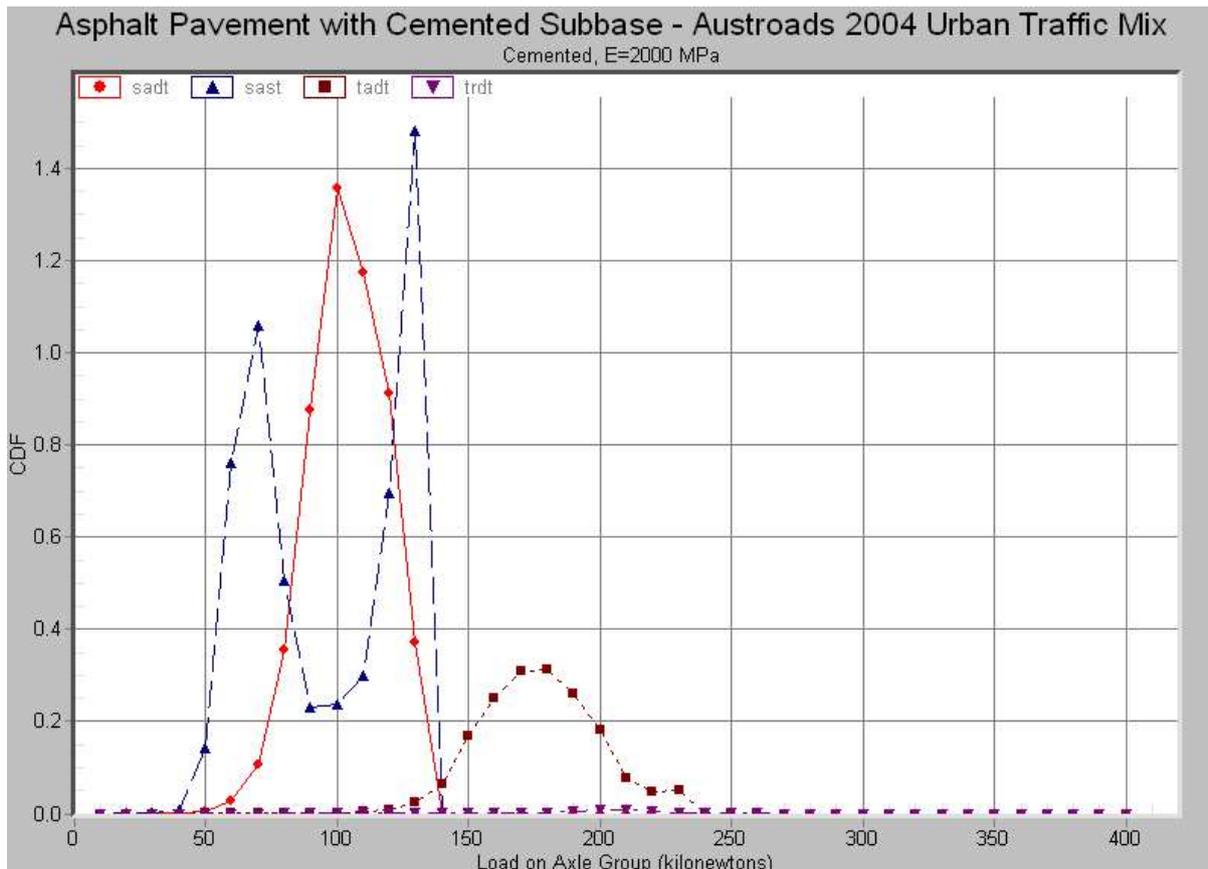


Figura 76

Fig. 76 Fattore di danno in HIPAVE – analisi degli spettri di carico

in cui:

Sast (asse singolo con pneumatici singoli)

Sadt (asse singolo con pneumatici doppi)

Tast (asse tandem con pneumatici singoli)

Tadt (asse singolo con pneumatici doppi)

Un altro esempio di integrazione dei WIM coi nuovi software di progettazione delle pavimentazioni riguarda gli Stati Uniti, dove è stato condotto uno studio (Wang et al.), in cui si è analizzato l'effetto di veicoli sovraccaricati e non, in 10 siti nel New

Jersey, aventi vari tipi di pavimentazione e vari spessori degli strati, come mostrato in tabella (tab.34).

Site	Pavement type	Layer Thickness (inch)		
		Asphalt	PCC	Base/Subbase
1	Thick Flexible Pavement	11.5	/	20
2		16	/	20
3		12	/	10
4		10.5	/	10
5	Composite Pavement	4.5	10	12
6		3	9	12
7		3.5	7.5	12
8		3.5	7	12
9	Thin Flexible Pavement	4.5	/	20
10		2	/	18

Tabella 34

Tabella 34. Riassunto delle strutture di pavimentazione

Anche le condizioni iniziali delle pavimentazioni sono state considerate per l'analisi (tab.35), tramite il software "Pavement M-E.

Performance criteria	Limit
Initial IRI (in/mile)	63
Terminal IRI (in/mile)	172
AC top-down fatigue cracking (ft/mile)	2000
AC bottom-up fatigue cracking (%)	25
AC thermal fracture (ft/mile)	1000
Permanent deformation - total pavement (in)	0.75
Permanent defamation - AC only (in)	0.25

Tabella 35

Tabella 35. Criteri di progetto per "Pavement M-E"

Per valutare gli effetti dei veicoli in sovraccarico rispetto al totale, si è introdotto un rapporto di riduzione della vita della pavimentazione, valutato come:

$$\frac{L_0 - L_x}{L_0}$$

in cui, L_0 è la vita della pavimentazione a causa del traffico totale, e

L_x è la vita della pavimentazione a causa dei veicoli non in sovrappeso

Il risultato di questo studio si evince dalla figura (fig. 77).

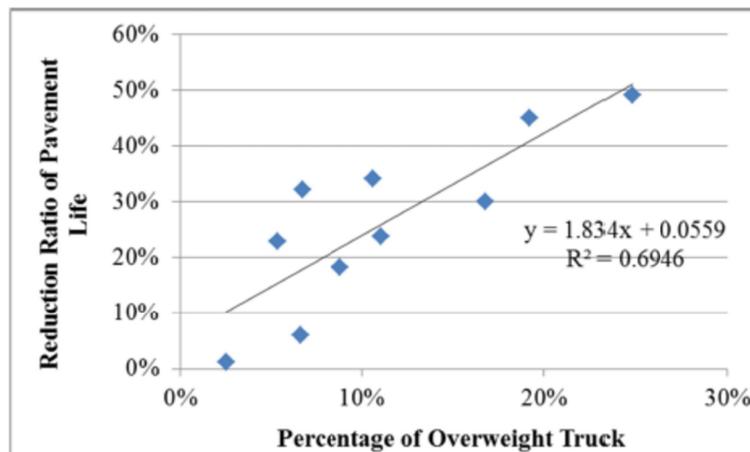


Figura 77

Fig. 77. Rapporto di riduzione della vita della pavimentazione per differenti percentuali di veicoli in sovraccarico

Si può evincere che sussiste una relazione lineare tra carico di traffico e struttura della pavimentazione; più in generale, si vede che l'incremento dell'1% dei veicoli in sovrappeso determina una riduzione di vita della pavimentazione dell'1.8%. Inoltre ci si aspetta che in termini assoluti, la differenza di vita di una pavimentazione dipende molto dalle caratteristiche del traffico, dalla struttura della pavimentazione e dalle condizioni in-situ del tratto di strada considerato.

E' stato anche effettuato un confronto fra i valori stimati dal software e quelli determinati tramite analisi sul campo, ed i risultati appaiono in figura (fig.78).

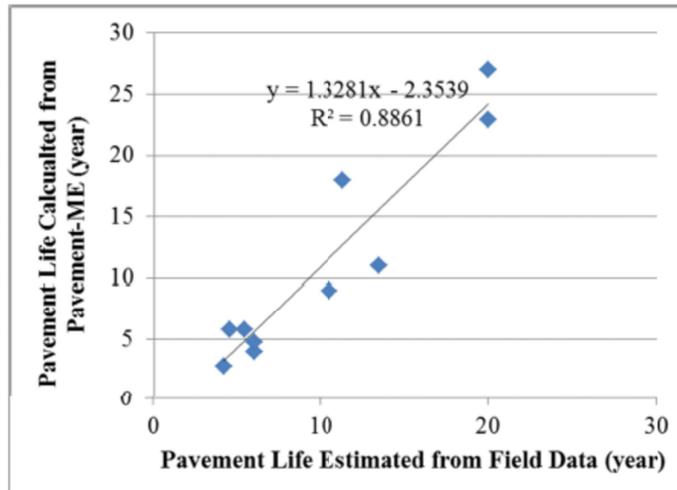


Figura 78

Fig. 78. Comparazione tra la vita della pavimentazione stimata dall'analisi M-E ed i dati ottenuti in sito

I risultati sono molto simili, e questo indica la bontà del nuovo modello e quindi la possibilità di una sua applicazione.

Un altro caso di studio, effettuato da Abu Faruk, Wenting Liu et al. In Texas, ad Hidalgo County, vicino al confine col Messico, ha riguardato l'utilizzo di WIM portatili per raccogliere i dati poi integrati nel sistema MEPDG; questo ha portato una serie di risultati evidenziati qui nelle figure sottostanti (fig. 79, 80, 81):

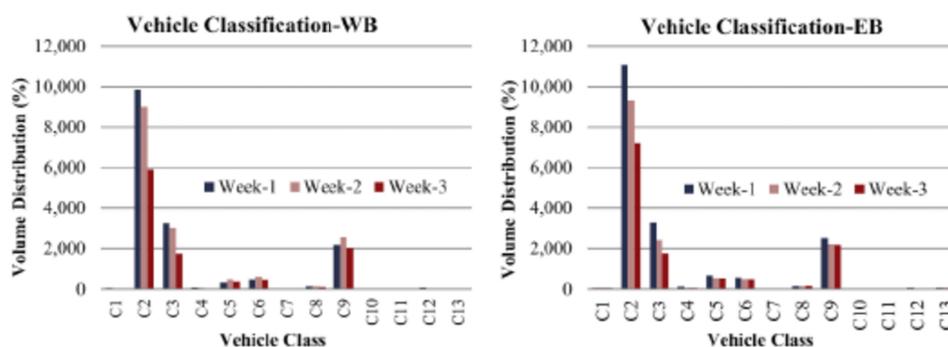


Figura 79

Fig. 79. Variazione settimanale dei dati riguardanti la classificazione dei veicoli lungo le 2 direzioni (WB e EB)

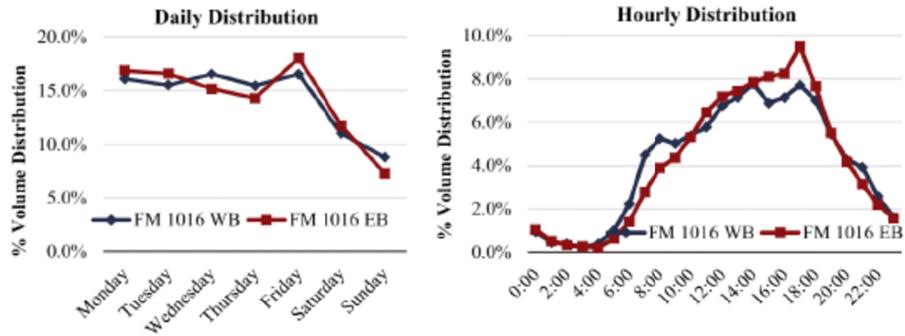


Figura 80

Fig. 80. Distribuzione giornaliera ed oraria del volume di traffico

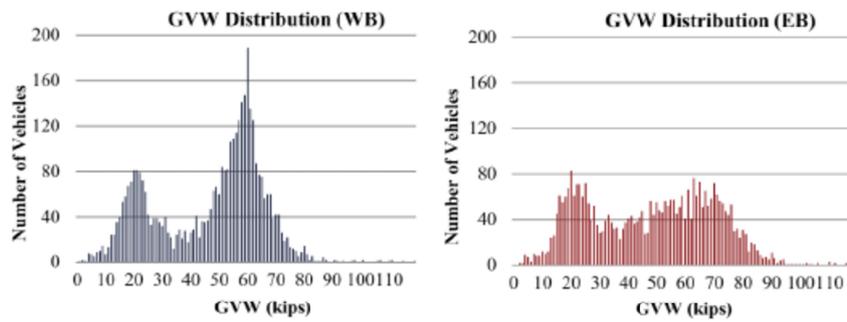


Figura 81

Fig. 81. Distribuzione del peso lordo del veicolo per direzione (WB e EB)



Figura 82

Fig. 82. Condizioni della pavimentazione nell'estate 2015

Dalle analisi dei dati raccolti sono apparse subito all'occhio due componenti:

- la calibrazione degli strumenti nel caso di WIM portatili è essenziale per raccogliere dati veritieri e che possano essere usati per analisi progettuali, e comunque questi dati debbono riguardare la prima settimana di osservazione se i sensori sono esposti direttamente al flusso veicolare dei mezzi pesanti, in quanto vengono danneggiati in maniera considerevole;

- lo stato di danneggiamento della pavimentazione è decisamente più severo nella direzione in cui un numero maggiore di mezzi pesanti la attraversano (fig. 82).

Questo caso dimostra che anche un sistema WIM portatile (decisamente meno oneroso di uno fisso) può essere adottato, previa certi accorgimenti, per fini di progettazione stradale, soprattutto in strade non principali, in modo da avere una miglior percezione globale dello stato della rete stradale.

In Portogallo invece è stato effettuato uno studio (Mechanical-Empirical Pavement Design Guide Applied to Portuguese Pavement Structures, di Rita Justo-Silva, Fábio Simões e Adelino Ferreira) su come, partendo da dati WIM, l'utilizzo del sistema MEPDG per pavimentazioni flessibili dia la possibilità di conoscere preventivamente, e con alta affidabilità, tutti gli indici di performance delle pavimentazioni, e la loro evoluzione nel corso della vita utile (considerata di 20 anni – fig. 85 e 86).

Di seguito alcune conclusioni dello studio per tipologia di pavimentazione, di traffico e classe di fondazione (fig. 83 e 84):

Flexible pavement structures																
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Thickness (cm)	4	4	4	4	5	5	4	5	5	6	5	6	5	6	6	6
Stiffness Mod. (MPa)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Thickness (cm)	6	8	12	14	14	16	18	17	19	18	20	20	23	22	24	26
Stiffness Mod. (MPa)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Thickness (cm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Stiffness Mod. (MPa)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
HMA thickness (cm)	10	12	16	18	19	21	22	22	24	24	25	26	28	28	30	32
Structural Number (SN)	2.36228	2.63000	3.16544	3.43316	3.60639	3.87411	3.96860	4.00797	4.27569	4.31506	4.40955	4.58278	4.81113	4.85050	5.11822	5.38594

Key: HMA - Hot Mix Asphalt.

Figura 83

Fig. 83. Caratteristiche strutturali della pavimentazione

Class	Traffic				Foundation		Pavement
	AADTT	Traffic Growth Rate	Truck Factor	Heavy Trucks (20 Years)	Class	E (MPa)	Class
T ₆	150	3%	2	1.47×10^6	F ₂	60	P ₃
	150	3%	2	1.47×10^6	F ₃	100	P ₂
	150	3%	2	1.47×10^6	F ₄	150	P ₁
T ₅	300	3%	3	2.94×10^6	F ₂	60	P ₇
	300	3%	3	2.94×10^6	F ₃	100	P ₄
	300	3%	3	2.94×10^6	F ₄	150	P ₃
T ₄	500	4%	4	5.44×10^6	F ₂	60	P ₁₁
	500	4%	4	5.44×10^6	F ₃	100	P ₆
	500	4%	4	5.44×10^6	F ₄	150	P ₅
T ₃	800	4%	4.5	8.70×10^6	F ₂	60	P ₁₃
	800	4%	4.5	8.70×10^6	F ₃	100	P ₉
	800	4%	4.5	8.70×10^6	F ₄	150	P ₈
T ₂	1200	5%	5	1.45×10^7	F ₂	60	P ₁₅
	1200	5%	5	1.45×10^7	F ₃	100	P ₁₂
	1200	5%	5	1.45×10^7	F ₄	150	P ₁₀
T ₁	2000	5%	5.5	2.42×10^7	F ₂	60	P ₁₆
	2000	5%	5.5	2.42×10^7	F ₃	100	P ₁₄
	2000	5%	5.5	2.42×10^7	F ₄	150	P ₁₂

Figura 84

Fig. 84. Struttura della pavimentazione per combinazione di traffico e fondazione

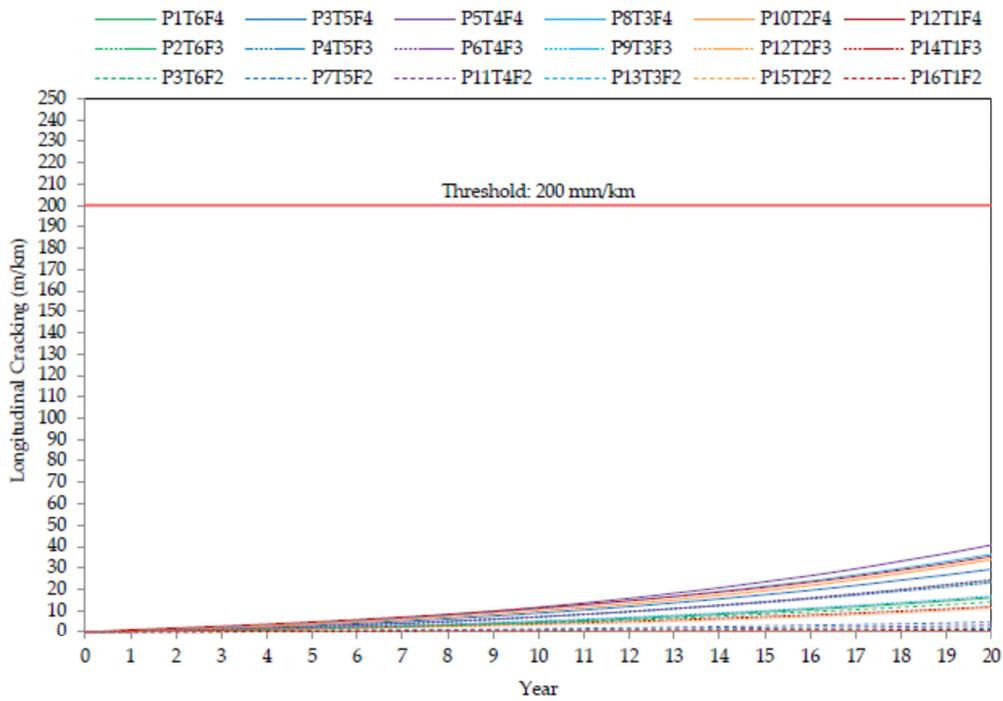


Figura 85

Fig. 85. Evoluzione della fessurazione longitudinale

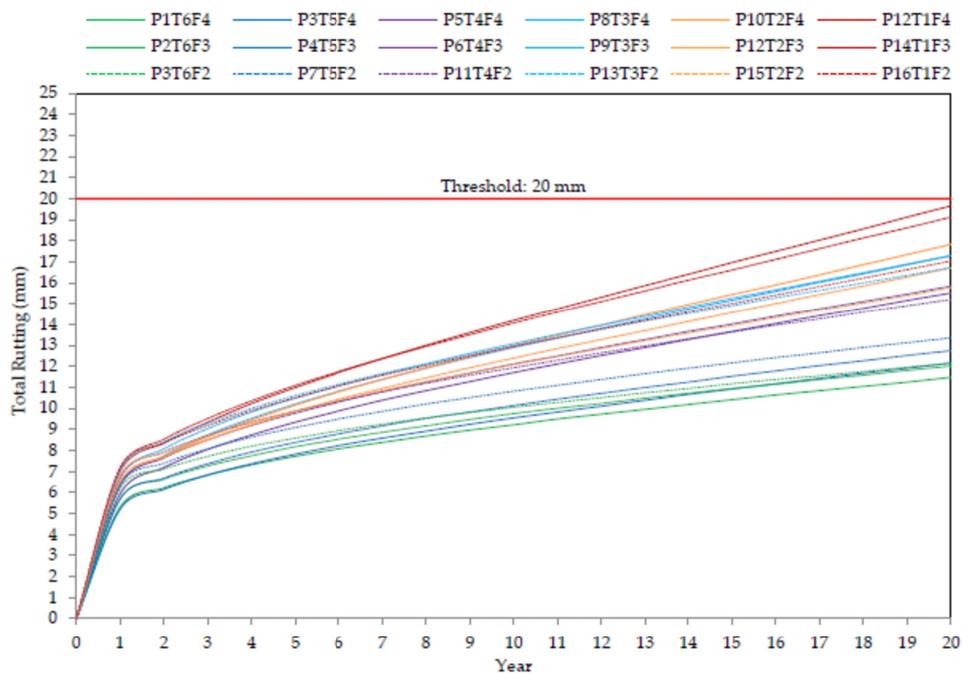


Figura 86

Fig. 86. Evoluzione dell'ormaiamento totale

Bibliografia

- “Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements”, Margarita Martínez Díaz
- “Traffic volume and load date measurement using a portable weigh in motion system: a case study”, Abu Faruk et al.
- “Impact of Overweight Traffic on Pavement Life Using Weigh-In-Motion - Data and Mechanistic-Empirical Pavement Analysis”, Hao Wang et al.
- “Integrating Weigh-In-Motion data with Mechanistic Pavement Analysis and Design”, Wardle Leigh J.; Cropley Stephen M.
- “Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird’s-eye view”, Qiang LI et al.
- “Mechanical-Empirical Pavement Design Guide Applied to Portuguese Pavement Structures”, Rita Justo-Silva, Fábio Simões and Adelino Ferreira

Conclusioni

Ormai non si può ignorare il fatto che avere una conoscenza approfondita e globale riguardante i dati di traffico lungo le arterie più “frequentate” porti, tramite l’uso di software adeguati in grado di gestire questa mole considerevole di dati, a risparmi notevoli in fase di progettazione e manutenzione delle pavimentazioni; in Italia ad esempio (fonte ANSFISA) nel 2021 è stato assegnato un finanziamento di 450

milioni di euro al programma “*Strade sicure-Implementazione di un sistema di monitoraggio dinamico per il controllo da remoto di ponti, viadotti e tunnel della rete viaria principale*”, per il miglioramento della sicurezza di queste infrastrutture.

Sempre più Paesi nel mondo, coi dovuti accorgimenti e differenze, stanno implementando questi sistemi nelle proprie guide di progettazione stradale, eppure in Europa ancora c'è una scarsità di informazioni legate a studi su questi sistemi e al loro impiego diretto sul campo.

E' auspicabile che ci si muova invece in questa direzione, in quanto futuri sviluppi di queste applicazioni (la raccolta di tutti i dati necessari, la loro verifica, la progettazione di software più precisi e più specifici per i diversi casi di utilizzo) porteranno sicuramente a migliorie nell'analisi economica generale; l'aumento dell'efficienza del controllo del peso riduce i costi per le risorse e le operazioni di applicazione del peso, mentre i costi relativi ai danni alle infrastrutture (ad es. tunnel, ponti), chiusure di strade e gallerie, lavori di rifacimento e riparazioni, vengono ridotti.

Inoltre anche gli utenti potranno godere di un maggior comfort e godranno di un livello di sicurezza maggiore; i pesi in eccesso sono pericolosi per la stabilità di un camion (il rischio che un conducente di un autocarro sovraccarico possa essere coinvolto in un incidente è quindi più elevato rispetto a quello di un camion caricato legalmente), ed aumentano la gravità delle conseguenze degli incidenti. Controlli determinati dall'uso dei sistemi W.I.M. avranno in questo senso una grande influenza sulla sicurezza stradale.

Sarà anche fondamentale stimare l'impatto potenziale sull'ambiente connesso all'intero ciclo di vita degli strati della pavimentazione, viste le enormi sfide che ci attendono da questo punto di vista nel nostro secolo.